

平成 27 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「超小型電子光学系と異形小型高真空ポンプを内蔵した  
小型・低価格な測長用電子顕微鏡 (CD-SEM) の開発」

研究開発成果等報告書

平成 28 年 3 月

委託者 九州経済産業局

委託先 公益財団法人福岡県産業・科学技術振興財団

**「超小型電子光学系と異形小型高真空ポンプを  
内蔵した小型・低価格な  
測長用電子顕微鏡(CD-SEM)の開発」**

**株式会社 TCK**

**国立研究開発法人 産業技術総合研究所**

**株式会社 山口光半導体研究所**

## 目 次

第1章 研究開発の概要 .....	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 .....	1
1-1-1 研究開発の背景	
1-1-2 研究目的及び目標	
1-2 研究体制 .....	5
1-3 成果概要 .....	9
1-3-1 「超小型電子光学系の開発」	
1-3-2 「異形小型化高真空ポンプの開発」	
1-3-3 「線幅判定アルゴリズムの開発」	
1-4 当該プロジェクト連絡窓口 .....	10
第2章 本論 .....	11
2-1 超小型電子光学系の開発 .....	11
2-1-1 開発目的と目標	
2-1-2 研究成果	
2-1-2-1 CD-SEM用超小型電子光学系基本体の設計	
2-1-2-2 CD-SEM用超小型電子光学系基本体の製作及び調整	
2-1-2-3 CD-SEM用超小型電子光学系基本体の評価	
2-1-3 今後の課題	
2-2 異形小型化高真空ポンプの開発 .....	23
2-2-1 開発目的と目標	
2-2-2 研究成果	
2-2-2-1 CD-SEM用異形小型化高真空ポンプ・制御電源の設計	
2-2-2-2 CD-SEM用異形小型化高真空ポンプ・制御電源の製作及び調整	
2-2-2-3 CD-SEM用異形小型高真空ポンプ・制御電源の評価	
2-2-3 今後の課題	
2-3 線幅判定アルゴリズムの開発 .....	33
2-3-1 開発目的と目標	
2-3-2 研究成果	
2-3-2-1 線幅判定アルゴリズムの開発	
2-3-2-2 線幅判定アルゴリズムの評価	
2-3-3 今後の課題	
第3章 全体総括 .....	48
3-1 まとめ .....	48
3-2 事業化に向けて .....	48

# 第1章

## 研究開発の概要

# 第 1 章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### 1-1-1 研究開発の背景

消費者ニーズの多様化や商品ライフサイクルの短期間化が進む中、半導体や電子機器関連分野等の川下企業は、多品種少量生産の実現が急務になっており、その具体策のひとつとして、経済産業省が推進している革新的製造プロセス技術開発(以下:ミニマルファブ)も急ピッチで進んでいる。当該川下企業で製造される製品は、ユーザーの厳しい評価にさらされるコンシューマ分野なので、それに採用される半導体製品の安全性や長期信頼性の確保は必須となる。故に、多品種少量生産だとしても、歩留まりを指標とした工程管理による生産は重要であり、且つ、その生産ラインが採算割れしない為にも、設備投資に負担をかけない品質管理用計測装置と運用手法を実現する必要がある。

当該工程管理を運用する為には、インライン計測やオフライン解析技術を駆使した統計手法が不可欠である。その計測や解析に必要な各種装置のなかでも、前工程のマスク製造やデバイス製造における微細パターンの線幅計測とエッジ情報の収集を随時行う測長用電子顕微鏡(Critical Dimension measurement Scanning Electron Microscope: CD-SEM)は半導体生産における非常に重要な装置であるが、現行の CD-SEM は 12 インチウェハを対象とした大型で高価な装置であり、小型化や低価格化要求は多いにも関わらず、対応する市場製品は皆無である。

そこで本プロジェクトでは、徹底的な装置小型化と低コスト化に必要な要素技術の開発を推進し、それらを応用集積した CD-SEM を実現する為に、装置の中核技術である真空制御技術、電子線制御技術、データ解析技術などを主要テーマとして設定し、要素技術開発から製品化までを取り組むものである。

以下に本研究における開発テーマを図1として以下にまとめる。

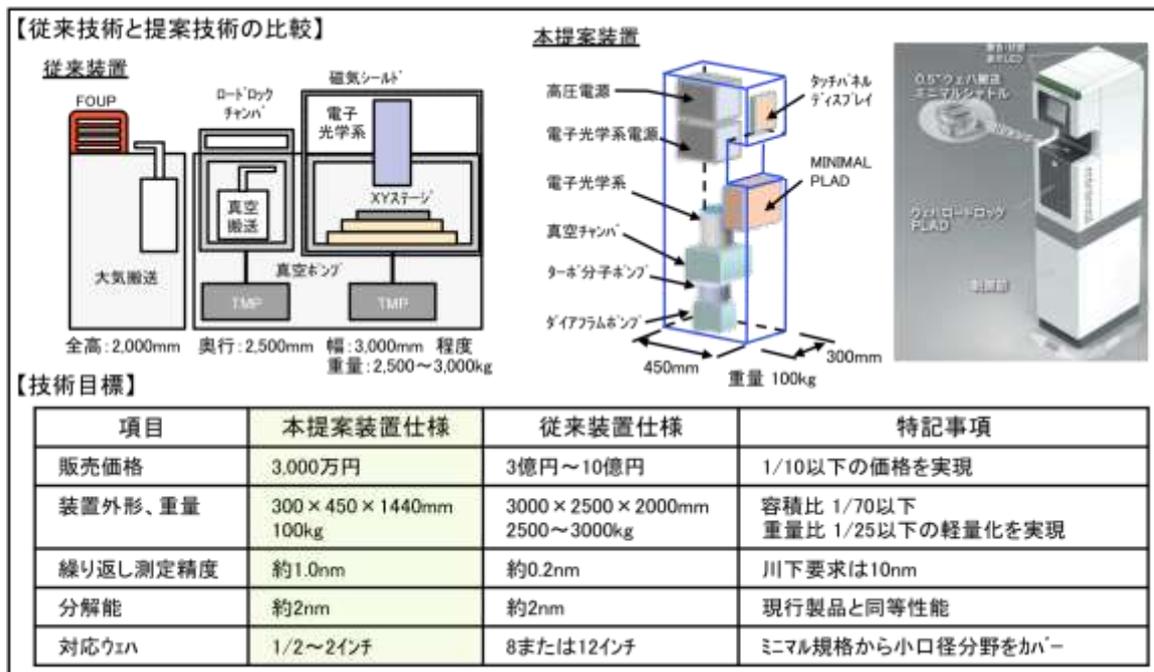


図 1 開発テーマ

### 1-1-2 研究目的及び目標

現在入手可能な半導体量産工場向け 12 インチ基板対応の CD-SEM を導入した製造ラインを構築すると仮定した場合の問題点を以下に列挙する。

#### 1. 高価格

実勢売価は数億円以上であり、小口径基板をベースとした多品種少量や変種変量生産における生産システムにとっては非常に大きな負担である。たとえば、ミニマルファブでは製造ライン全体での実勢売価は 5 億円以内を目標としていることから、ライン構成が不可能となる。

#### 2. 大型、厳しい設置基準、装置導入におけるコスト増大

いずれの装置にしても 2m×4m 程度の設置面積が必要であり単位面積(平米)あたり 1t を越える床耐荷重対応、磁場対策、床振動対策など、設置に伴う付帯経費が大きい。

いずれの問題も、今後の少量多品種生産におけるマーケット要求とは大きな隔りがある。また、価格問題はマーケットの根幹を脅かすレベルであり、それ 1 つをとっても現状の製造装置メーカーでは新たな装置開発へ速やかに移行する事は難しい。そこで本研究では以下に目的及び目標を定め、新市場への装置投入を計画する。

### 目的

今後の多品種少量半導体製造(ミニマルファブ)や小口径化合物半導体製造(~2 インチ)の市場拡大を支える、大幅な低コスト化と小型化を実現した CD-SEM の開発。

## 目標

### 1. 超小型電子光学系の開発

電子光学系においては、軸調整用アライメントコイルやコンデンサレンズ、対物レンズの動作原理は電磁場による電子線偏向である。発生する磁場強度は、コイルの巻線数とそこに流した電流の積に比例するので、各コイルに流す電流により電子線偏向を制御する。電子光学系を小型化する為にコイルを小型化した場合、細い線材を使用して小型容積で同等の巻き線数を実現する必要がある。しかし、そうするとコイルの直流抵抗値が上昇し、同一電流による励磁では、抵抗増加分の損失が熱となって発生する。また、巻き線数が足りない場合、励磁電流をさらに増加させることになるが、そうすると増加の2乗の損失発生となる。また、一般的な光学理論同様に、大きな縮小率を得る際には、結像時の光路長比率を大きく取る必要があるので、光学系は大きくなるのが普通である。

それらの理由により、電子光学系を小型化する事は難易度が高い開発であるが、コスト圧縮ならびに全体サイズの縮小には多大な効果がある。

- ・電子線源には熱電界放出型 (TFE) を採用し、汎用製品と同等性能を実現
- ・電子光学系レンズの複合化技術を開発し、光学系全体の小型化を実現

### 数値目標

項目	開発仕様	現行製品仕様	特記事項
電子線源構成	ZrO/W 熱電界放出	ZrO/W 熱電界放出	同等品
光学系全長 (大気側)	230mm 以内	各社平均 約 460mm 前後	1/2 以下
分解能	約 2nm	約 2nm	同等
特許申請項目	電磁レンズ <sup>1</sup> と静電レンズ <sup>2</sup> を組み合わせる小型化したハイブリッド <sup>3</sup> 光学系		

### 2. 異形小型化高真空ポンプの開発

TFE 電子線源を安定的に運用する為には、高真空領域で必要となる排気速度を実現する Sputtering Ion Pump (SIP) を電子線源近くに装着し、到達真空度と共に、水素やアルゴン等のエミッションを阻害する残留原子を吸着 (排気) する必要がある。しかし、ミニマル規格の電子光学系を開発する際には、市販品の SIP は外形が大きく採用は難しい。また、体積効率を考慮すると、異形な形状として限られた空間に収納する必要があるが、それにも真空ポンプメーカーは未対応である。

- ・異形小型化しても汎用製品以上の性能を発揮する高性能真空ポンプの開発

### 数値目標

項目	開発仕様	現行製品仕様	特記事項
ポンプ <sup>1</sup> 構成	SIP 機能とゲッタ材 <sup>2</sup> の複合	SIP 機能のみ	---

	ポンプ		
寸法	100×120×120mm 以内	216×133×187mm	1/2 程度
到達真空度	1×10 <sup>-6</sup> Pa	1×10 <sup>-6</sup> Pa	当該電子光学系で評価
特許申請項目	ブラックボックスとしてノウハウ化し完全非公開とする		

### 3. 線幅判定アルゴリズムの開発

汎用大型 CD-SEM においては、二次電子検出器の出力信号をサンプリングし、デジタル演算により二回微分して得られる変極点情報からエッジ位置の確定を行っている。その際に、エッジラフネスやパターンラフネスの情報は、別処理系により活用すると共に、線幅判定としての誤差要因とならないように各種デジタルフィルタにより抑圧・平滑化・除去している。そして、この処理においては数学的理論と経験値から構成された大規模なソフトウェアが各社ごとに使用されている。

しかし、多品種少量製造ラインでは、要求される計測精度を満たす事と同時に、高速処理を実現することが求められる。現時点においては、当該要求を満たすようなソフトウェアはないため、目的に合致した最適化ソフトウェアを最新アルゴリズムで開発する必要がある。

- ・高速処理アルゴリズムによる線幅計測技術の開発と CD-SEM への融合

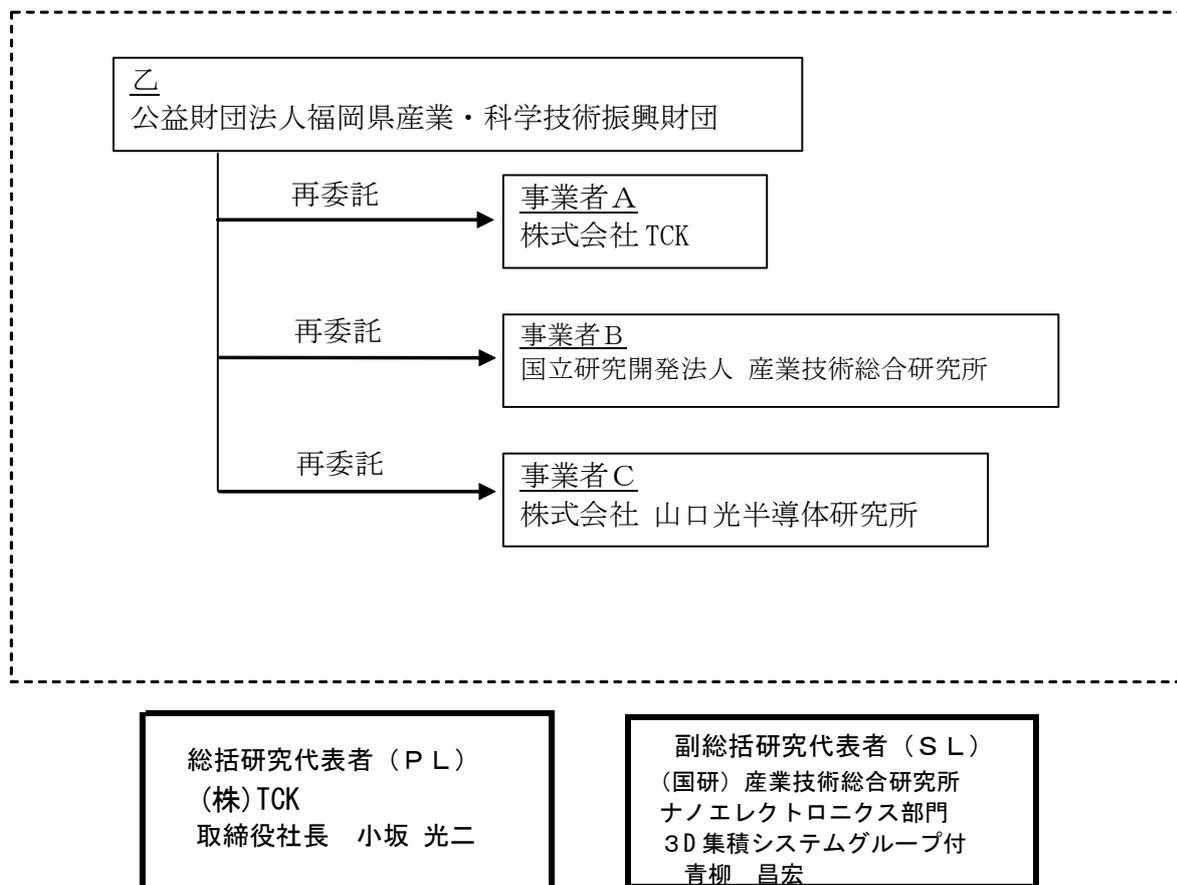
#### 数値目標

項目	開発仕様	現行製品仕様	特記事項
計測時間 (1ヶ所)	0.1 秒	0.5 秒	5 倍
特許申請項目	ビーム変調とアナログ処理を応用した高速二値化アルゴリズム		

## 1-2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

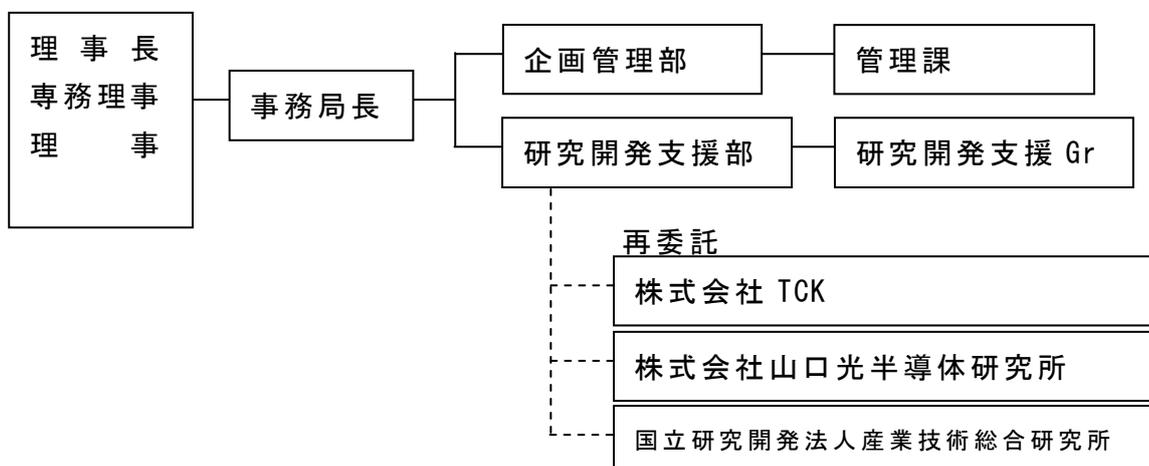
#### 1) 研究組織 (全体)



#### 2) 管理体制

##### ① 事業管理者

[公益財団法人福岡県産業・科学技術振興財団]

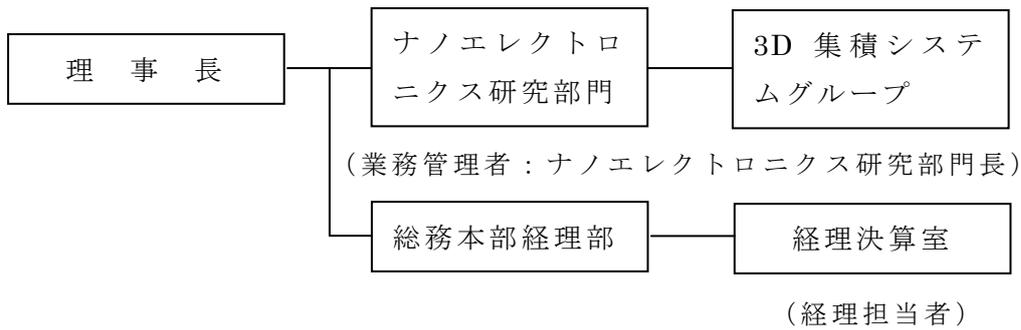


②（再委託先）

[株式会社TCK]



[国立研究開発法人産業技術総合研究所]



[株式会社山口光半導体研究所]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 公益財団法人福岡県産業・科学技術振興財団

①管理員

氏名	所属・役職	備考
清水 宏昭	研究開発支援部長兼有機光エレクトロニクス部長	
御幡 弘明	研究開発支援部 主幹	
山口 哲	研究開発支援部 研究員	
前田 弘幸	研究開発支援部 主査	
松尾 明子	研究開発支援部	
赤岩 朋美	研究開発支援部	
久家 修児	企画管理部 管理課長	
青木 純子	企画管理部 管理課 主査	
河行 誠人	企画管理部 管理課 主任	

【再委託先】※研究員のみ

株式会社 T C K

氏名	所属・役職	備考
小坂 光二	取締役社長	PL
大江 隆	開発課 課長	
国松 浩司	開発課 主任	
徳田 基	開発課 主任	
江崎 学	開発課 一般	

国立研究開発法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	備考
青柳 昌宏	ナノエレクトロニクス研究部門 3D集積システム グループ付 つくばイノベーションアリーナ推進 センター 連携推進ユニット長 兼務	SL
渡辺 直也	主任研究員	
フェン・ウェイ	研究員	

株式会社山口光半導体研究所

氏名	所属・役職	備考
杉浦 文彦	代表取締役社長	
万波 徹	技術員	

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

公益財団法人 福岡県産業・科学技術振興財団

(経理担当者) 企画管理部 管理課長 久家 修児

(業務管理者) 研究開発支援部  
兼有機光エレクトロニクス部 部長 清水 宏昭

(再委託先)

株式会社 T C K

(経理担当者) 業務部 経理課長 木下 珠美

(業務管理者) 開発部 開発課長 大江 隆

国立研究開発法人産業技術総合研究所

(経理責任者) 総務本部 財務部 経理室長 山口 洋二

(業務管理者) ナノエレクトロニクス研究部門長

安田 哲二

株式会社山口光半導体研究所

(経理責任者) 代表取締役社長

杉浦 文彦

(業務管理者) 技術員

万波 徹

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

推進委員会委員

(外部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
西尾 英俊	オムロン株式会社マイクロデバイス事業部 営業推進部 戦略・技術開発担当	アドバイザー
井上 道弘	国立研究開発法人産業技術総合研究所 研究参与	アドバイザー
猿渡 新水	国立研究開発法人産業技術総合研究所 イノベーションコーディネーター	アドバイザー
友景 肇	福岡大学 工学部電子情報工学科教授	アドバイザー
須川 成利	東北大学 工学研究科技術社会システム専攻教授	アドバイザー

(内部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
小坂 光二	株式会社TCK 取締役社長	PL委
大江 隆	株式会社TCK 開発課 課長	委
青柳 昌宏	国立研究開発法人産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 3D集積システムグループ付 つくばイノベーションアリーナ推進センター 連携推進ユニット長 兼務	SL
杉浦 文彦	株式会社山口光半導体研究所 代表取締役社長	
清水 宏昭	公益財団法人福岡県産業・科学技術振興財団 研究開発支援部兼有機光エレクトロニクス部 部長	
野村 眞一	公益財団法人福岡県産業・科学技術振興財団 産学コーディネータ	

### 1-3 成果概要

#### 1-3-1 「超小型電子光学系の開発」

##### 数値目標と研究成果

項目	目標	成果	判定
電子線源構成	ZrO/W 熱電界放出	ZrO/W 熱電界放出	達成
光学系全長 (大気側)	230 mm 以内	228mm	達成
分解能	約 2 nm	8nm	継続中 (達成見込)

電子顕微鏡のメインユニットとなる電子光学系の電子線源の構成や全長の目標は達成できた。また付加機能となる搬送系の開発は順調に開発ができた。しかし、装置としての性能となる分解能においては、現時点で8nmにとどまる結果となっている。本結果では、開発当初に掲げた目標には及ばなかったが、川下産業となるミニマルファブをはじめとするいくつかの市場における要求は10nmであり、十分に市場投入が可能な結果となった。

以上をもって、今後は補完研究による高性能化を目指す。

#### 1-3-2 「異形小型化高真空ポンプの開発」

##### 数値目標と研究成果

項目	目標	成果	判定
ポンプ構成	SIP機能とゲッタ材の複合ポンプ	SIP機能とゲッタ材の複合ポンプ	達成
寸法	100×120×120 mm 以内	100×100×160mm	達成
到達真空度	$1 \times 10^{-6}$ Pa	$3.0 \times 10^{-9}$ Pa	達成

ポンプ構成として、SIPとゲッタ材による複合構成を達成できた。また外形寸法についても容積として同等の大きさとするのができた。さらに到達真空度は、当初の目標をはるかに上回る高性能を達成することができた。これによりCD-SEMとしての製品安定度が格段に向上した。また、本ポンプは単体のみで製品化が可能であり、現在もいくつかの引き合いがある状況ゆえ、性能検証と継続的に行うとともに早急に市場へ投入する。

#### 1-3-3 「線幅判定アルゴリズムの開発」

##### 数値目標と研究成果

項目	目標	結果	判定
計測時間(1ヶ所)	0.1秒	0.083s	達成
高精度化	1nm以下	2.7nm	継続中 (達成見込)

取得したCD-SEM画像における評価を繰り返し、線幅計測用ソフトウェア体系を完成さ

せると共に、必要となる処理をアルゴリズムとして再構築する事により、目標としていた処理時間を達成した。ただし、高精度化の CD 測定平均値に関しては、電子光学系の高分解能化におけるノイズがネックとなり、わずかに目標に届かず現在継続中である。

以上をもって、今後は補完研究による高性能化を目指す。

#### 1-4 当該プロジェクト連絡窓口

公益財団法人 福岡県産業・科学技術振興財団 研究開発支援部

TEL : 092-832-1301      FAX : 092-832-1309

## 第2章

### 本論

## 2-1 超小型電子光学系の開発

株式会社TCK

取締役社長	小坂 光二
開発課 課長	大江 隆
開発課 主任	国松 浩司
開発課 主任	徳田 基
開発課 一般	江崎 学

国立研究開発法人産業技術総合研究所

ナノエレクトロニクス研究部門

3D集積システムグループ付

つくばイノベーションアリーナ推進センター

連携推進ユニット長 兼務 青柳 昌宏

主任研究員 渡辺 直也

研究員 フェン・ウェイ

## 第2章 本論

### 2-1 超小型電子光学系の開発

#### 2-1-1 開発目的と目標

ミニマルファブの筐体規格に準拠したCD-SEMを開発するにあたり、装置を構成している各主要ユニットの性能維持を前提とした小型化が必須となる。また、電子線源には熱電界放出型（TFE）を採用する事で世界標準の性能を実現する。そして、電子光学系を小型化するために電子光学系レンズの複合化技術を開発する。そこで、サブテーマ[1]超小型電子光学系の開発においては、①CD-SEM用超小型電子光学系基本体の設計、②CD-SEM用超小型電子光学系基本体の製作及び調整、③CD-SEM用超小型電子光学系基本体の評価に取り組む。

表1 開発目標

項目	目標
電子線源構成	ZrO/W熱電界放出
光学系全長（大気側）	230 mm 以内
分解能	約 2 nm

#### 2-1-2 研究成果

##### 2-1-2-1 CD-SEM用超小型電子光学系基本体の設計

CD-SEMの中核機能となる電子光学系基本体の設計には、(株)TCKがこれまで開発してきた電子光学系や真空装置、超精密ステージの開発技術を基に取り組んだ。

また、電子光学系の設計では、産業技術総合研究所が有する電子光学系シミュレーションで、設計した電子光学系を評価し、その結果を設計に反映した。

設計全体構成に際しては以下の点に留意した。

- ①電子銃、超小型電子光学系、二次電子検出器で構成される電子光学系の機械的全長は230mm以下とする。
- ②電子銃、高圧電源、超小型電子光学系・制御電源、非磁性ステージ、真空チャンバ、二次電子検出器、ドライ真空システムを組み上げ後の到達真空度は $1 \times 10^{-6}$ Pa以下とする。
- ③電子線源はZrO/W熱電界放出型(TFE)とする。
- ④圧電アクチュエータを駆動源とする真空対応小型精密ステージを搭載する。
- ⑤搭載するソフトウェアに以下の機能を盛り込む。
  - ・電子線源エミッション状態の管理
  - ・電子光学系における照射電流値の設定
  - ・画像観察する際の走査速度や処理系フィルタの選択

- ・ 試料ステージの手動移動および自動移動

⑥CD-SEMの分解能評価や性能向上には以下の機能を有した搬送機構を搭載する

- ・ 「ミニマルシャトル」から「ミニマルPLAD」により搬送されるウェハをXYZの直交座標系で規定された筐体内の小空間での構成
- ・ 複数軸でウェハを真空チャンバ内に搬入・搬出
- ・ 搬送機構のモーションコントロールを多軸で精密かつ正確に駆動

具体的には、以下の条件を考慮しながら搬送機構の設計を行った。まず、ウェハならびに評価用サンプルのハンドリングはミニマルファブシステムで規格化されている「ミニマルシャトル」と呼ばれる専用ケースを使用する事を前提とした。

このミニマルシャトルは、パーティクルやウェハ上に塗布されたレジストの感光を阻止し、高浄化条件下での試料ハンドリングを可能とする。

また、このシャトルを使用した事で装置内への大気搬送機構としても、規格化されたミニマルPLADを運用可能となる。しかし、この装置内に搬送されるウェハは搬送高さが床面より1020mmと規定されているため、その高さより低位置にある真空チャンバへの搬送には、XYZの直交座標系で規定される筐体内の限られた小空間を、それぞれ複数の軸で構成した搬送系によってウェハを往復させなければならない。

これらの一連動作により、ウェハが大気環境から真空チャンバ内部まで搬送されるが、その制御にはモータで全6軸、ゲートバルブで2軸、ステージ部ではX-Y-Z-Rの4軸、そしてウェハチャックとして1軸の系13軸を連動制御して実現した。また、ウェハは空間における共有座標による受け渡し方式とし、それにはマイコンをフル活用した位置決め制御を応用した。この、空間上での受け渡し理由は以下のとおりである。

ミニマルPLADは、外部からのシャトル導入ユニットとしての役割を担い、フレーム固定型として取り付けられている。一方で、SEMの真空チャンバならびに電子光学系は、nmレベルの分解能を実現するために、床振動やフレーム伝搬振動などからの除振構造を取っている。それにより、振動吸収を実現する替わりに、フレームとの位置関係を不定としている。つまり、フレーム基準による搬送では、免振機構上に搭載されている搬送系を直接狙った受け渡しは非常に困難となる。故に、仮受ポイントでの位置整合を行いながら、免振機構の性能を最大限に保証するために機械的結合を避けて、空間の共有座標による受け渡しを選択した。

なお、真空チャンバから大気環境へウェハを取り出す際には、上記シーケンスの逆行動作を行う事で実現した。

以上の各ユニット動作シーケンスを筐体内の小空間で多軸制御を実行し、なおかつ電子銃への安全配慮ができた機構設計、制御回路設計およびソフトウェアの開発を実施した。

さらに、最終的にCD-SEMに求められる性能で必要となるサブテーマ[3]線幅判定アルゴリズムの目標を達成するためには、取得する画像が計測に使用できる高

品質なものではなくてはならない。そこで、画質を向上させるためにノイズを徹底的に抑制する改造を行った。

⑦現在の装置構成から画像に混入しているノイズの種類とその要因について考察した。その結果として考えられるものとしては、以下の3つが挙げられる。

- ・ 設置している床からの振動や装置に使用している機材の振動による機械的なノイズ
- ・ 電子光学系基本体の画像は電氣的な制御によるが、それらの制御に関わる微少信号にモータなどをはじめとするパワー系統の電力ラインの影響による電氣的なノイズ
- ・ 設置している建物自体の商用電源やエレベータの大出力モータなどの磁場を動かす機材による磁気ノイズ

これら3つのノイズによる画像への影響を最小限に止めるため、各要因の発生原因は影響を抑制する有効な手段を検討し設計に反映することとした。

①から⑦までの内容を反映して設計したものが以下の図1のとおり。



図1 超小型電子光学系基本体設計図の外観および内部構造

## 2-1-2-2 CD-SEM用超小型電子光学系基本体の製作及び調整

CD-SEM用超小型電子光学系の基本体に最も必要となるのは、磁場変動の少ない安定的な高真空空間である。磁場変動の少ない空間は、設計時点での材料選定や各部品の最適配置が重要である。また、高真空環境も設計時の十分な配慮が必要だが、それ以上に組立調整時における熟練知識と、それに基づいた材料処理や作業が欠かせない。(株)TCKは、これまでの真空応用製品の開発で培ったノウハウを元に当該電子光学系の調整に取り組んだ。

まず、真空環境内で使用する全ての部品をクリーン化した。さらに、高真空領域で使用する部品は、その表面への分子吸着や極表面層への水素進入をブロックする処置を施す必要もあったため、全ての部品は超音波洗浄器を用いて以下の処理を行った。さらに高真空領域用部品については、以下の(1)工程の処理後に(2)工程も実施した。

### (1) クリーン作業

- ①バラシ作業 : 完成形の状態から部品1点1点の状態に戻す
- ②洗浄(一槽目) : 超音波洗浄器と超純水を用いて部品表面に付着している僅かな油や細かなパーティクルを除去
- ③洗浄(二槽目) : 超音波洗浄器とアルコールを使用して一槽目で除去しきれなかった油やパーティクルを除去
- ④拭き取り作業 : アルコールとワイパーにて拭き取り仕上げ

### (2) 脱ガス処理

- ①焼だし作業 : 真空状態にした容器内で高温に保ち数時間ほどベーキング
- ②徐冷処理 : 真空環境において、ベーキング後の部品を常温復帰

## 2-1-2-3 CD-SEM用超小型電子光学系基本体の評価

### (1) 電子光学系の設計要素を基にした電子線軌道解析のシミュレーション

最終的なシミュレーション結果を示す(表2)。この内容を電子光学系の設計に反映した。

表2 シミュレーション結果

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
加速電圧(kV)	2	2	2	2	5	0.5	0.5	0.5
プレート電極(kV)	-1.5	0	2	3	5	-0.1	0	0.8
OL AT	1642	2346	2563	2804	4503	1232	1244	1349
球面収差(mm)	3.20	2.28	2.06	1.89	1.95	2.45	2.34	2.22
色収差(mm)	4.49	2.68	2.32	1.92	2.11	2.99	2.65	2.47
分解能(nm)	1.71	1.50	1.47	1.41	0.90	3.67	3.61	3.50

研究開発当初のシミュレーションによる理論分解能目標は0.8nm以下だったが、最終到達値は0.9nmとなった。しかし、各パラメータ設定の限界値まで到達したためシミュレーションを終了し、実体の製作に移行した。シミュレーション値が目標に達しなかった理由としては、実機における最終目標2.0nmに対して、シミュレーションにおける目標値をその2倍とし、さらに、経験則によるエラー保証値を20%とっていたためと考えられる。この経験的数値を10%と想定、実機での目標を達成可能と判断した。すなわち、本シミュレーションで得られた0.9nmを指針とし、最終目標である実機における2.0nm分解能を達成することとした。

なお、シミュレーションにおける分解能は、前提条件から得られる輝度、球面収差、色収差などの総和を各条件にて算出した(図2)。

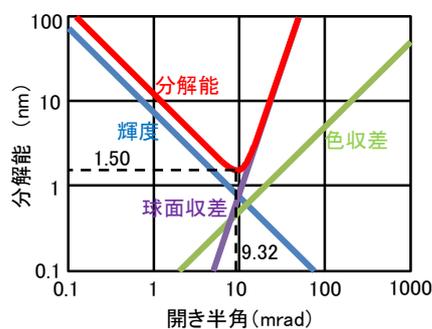


図2 No. 2条件時の解析因子相関

### (2) 搬送系の調整

大気環境から真空チャンバへのウェハ搬送(ロード)における工程数は28あり、基本調整完了時における搬送シーケンスの合計時間は9分20秒であった。また、逆

の真空チャンバから大気環境へのウェハ搬送（アンロード）における工程数は26であり、同時期のシーケンス合計時間は9分14秒であった（図3）。

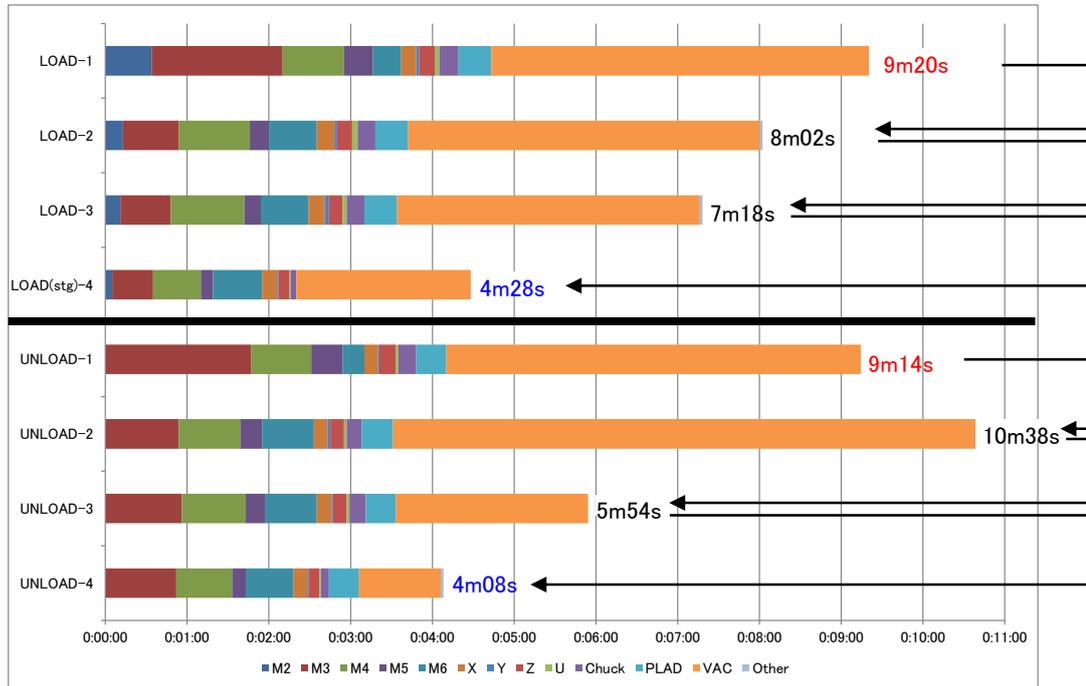


図3 チューニング前後の搬送時間

ロードならびにアンロードのいずれもの工程においても、この時間では先の社内基準として定めた搬送時間5分という目標を満たせないばかりか、2倍弱もかかる搬送では製品化の大きな障害となってしまう。

以下の高速化に直結する項目をチューニングした。

- ①ロード/アンロード時における、最初のゲートバルブ開閉を先回り実行
- ②制御ファームウェアを2-Thread化
- ③搬送軸の移動速度を2倍向上
- ④ゲートバルブ開閉時間短縮（シーケンス見直し）

これらの対策により、ロードにおけるシーケンス合計時間は4分28秒まで、またアンロードの合計時間も4分8秒までそれぞれ短縮されて、目標を達成できた。

### (3) 要因別評価によるノイズ対策

#### ①振動評価

製作および調整工程で計測した結果を基に振動対策を行った真空ポンプA、Bの関連ポイントを計測した。真空ポンプA、Bの振動は架台フレームのベースからチャンバベースまで振動を伝えるため、架台フレームのベース部の振動特性を計測した。製作および調整で計測した結果は真空ポンプA、Bの各ポンプ単体では200um程度であったが、対策を施した状態で二つのポンプの振動量総和として架台フレームベースへの伝播量としては16umまで抑制することができた（図4）。

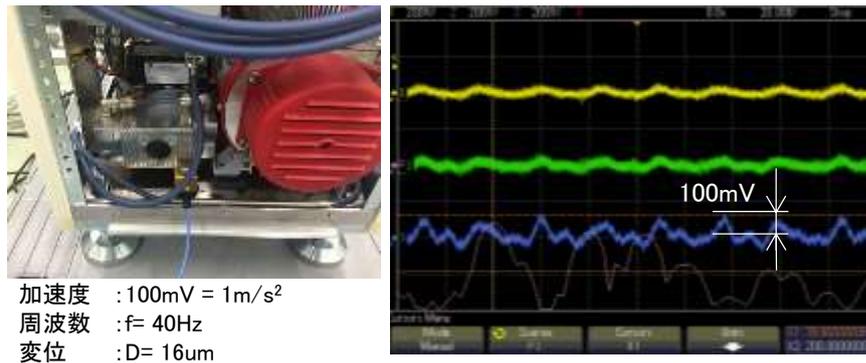


図4 架台フレームベース部の振動計測結果

次にチャンバベースプレートには振動が架台フレームを伝わった振動と真空ポンプCの振動が混合して伝達したものが振動量の総和となる。測定結果としては、製作および調整で計測した56nmの振動が、ダンパ等の振動対策により1.4nmの振幅まで抑えることができた（図5）。

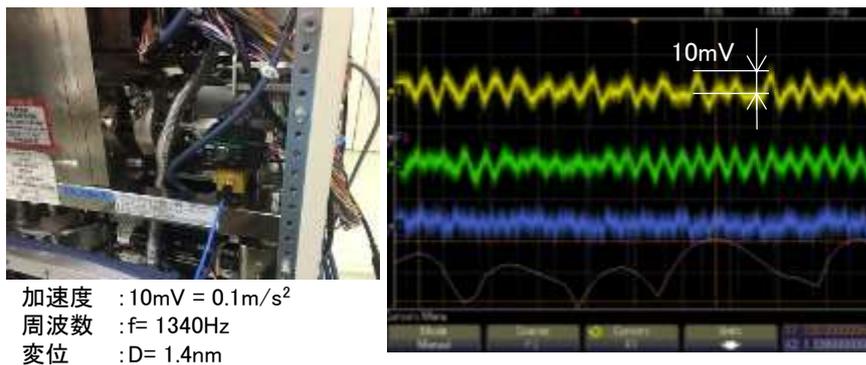


図5 チャンバベースプレート部の振動計測結果

## ②電氣的ノイズ評価

制御基板の製作に合わせて、アナログ用コントローラへノイズカット用のフィルタを追加した。この部分の機能は、画像生成時に電子制御基板で生成する信号をアナログ用コントローラから送出している。その信号をS/N比を高い状態にするためノイズカットフィルタを追加した。対策前後の画像の結果を図6及び7に示す。対策前にはSEM画像に縦方向200本程度のノイズが混入し画質の低下を招いていたが、改良後にはそのノイズ類は減少しており、画像がクリアになった。

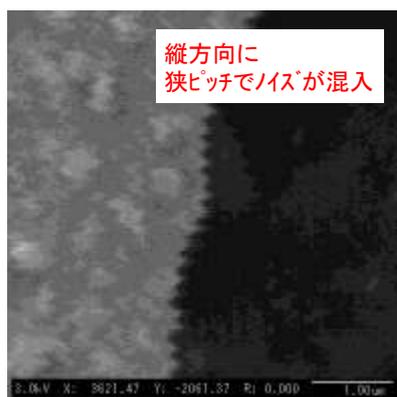


図6 改良前

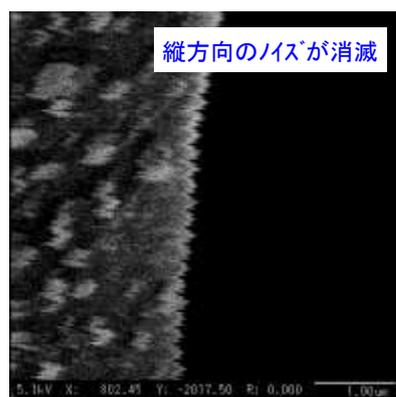


図7 改良後

### ③磁気ノイズ評価

製作および調整の工程で周辺磁場の計測を行い電子光学系周辺で大きな磁場変動が確認されたため、装置外面を簡易的に高透磁率材料のパーマロイでシールドし、そのシールドの有無による効果を評価した。そのシールド外観図とシールド有無によるSEM画像を図8及び9に示す。

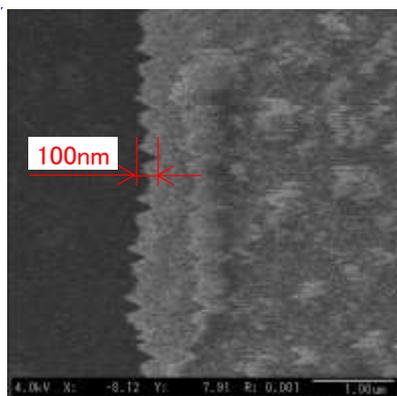


図8 シールド無

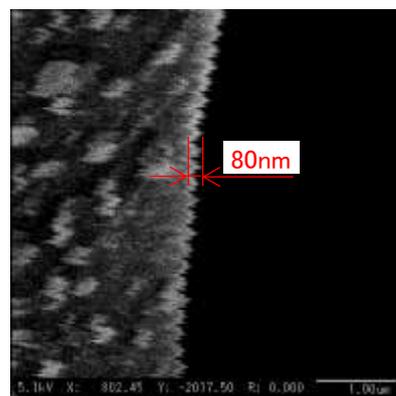


図9 シールド有

次に、ドロップ電源部に注目した。ドロップ電源は交流からノイズの少ない直流に変換しているが、そこに引き込む交流電源が磁場変動を招き電子光学系に悪影響を与えていると考えられた。そこでドロップ電源上のトランスをパーマロイでシールドして評価を行った。0.3mmのパーマロイのシールドカバーを取り付けた状態の外観を図10に、その際の画像を図11に示す。

磁気シールド  
パーマロイ0.3mm



図10 外観図

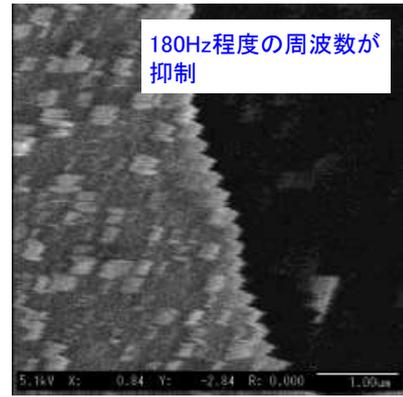


図11 SEM画像

電源用トランスのシールドがない場合ではSEM画像にノイズとして60Hzと180Hzの周波数が混在していたが、シールド効果によって180Hzの周波数が抑制された。これにより画像が細かく揺れていた部分がクリアになり画質が向上した。

磁気ノイズの評価で画像が電源系統に依存している点が見られたため、画像生成時のアルゴリズムに電源と同期する機能を追加した。その機能追加前後の評価後の画像を図12及び13に示す。

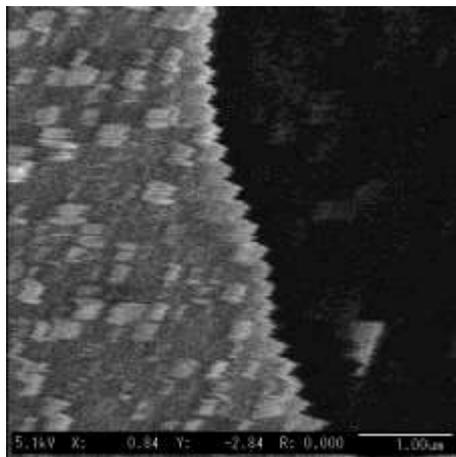


図12 機能追加前

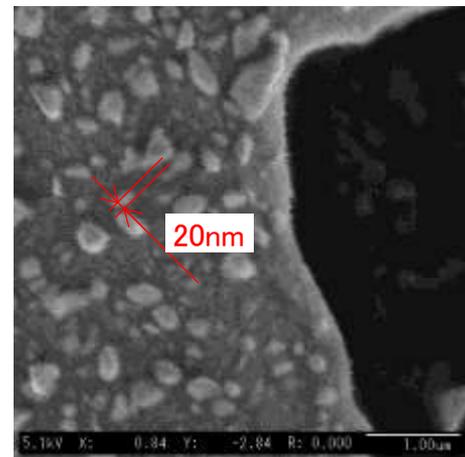


図13 機能追加後

この追加機能と電源用トランスシールド効果によって分解能が60nmから20nmまで向上した。

#### ④電氣的ノイズ評価の追加検討

機械的ノイズと磁気ノイズの抑制により分解能20nmまで画質が向上したが、目標達成には更なる改良が必要となった。そこで、電氣的なノイズ対策としてケーブルの見直しを行った。対策の内容は以下のとおりである。

- ・ケーブルの芯線を1サイズ上の太い物に変更する。

- ・ツイストペア線を使用したケーブルの適用範囲を拡大する。
- ・シールドケーブルに変更する。
- ・ケーブルの引き回し経路を変更する。

上記手法にて装置内のケーブルを改良した。得られる効果としては予期せぬ信号が入るクロストークの発生を抑え、画像生成用の信号に混入する信号の低減である。それにより画像に混入しているノイズを抑制できると考えた。それらの対策を施して取得した画像を図14に示す。

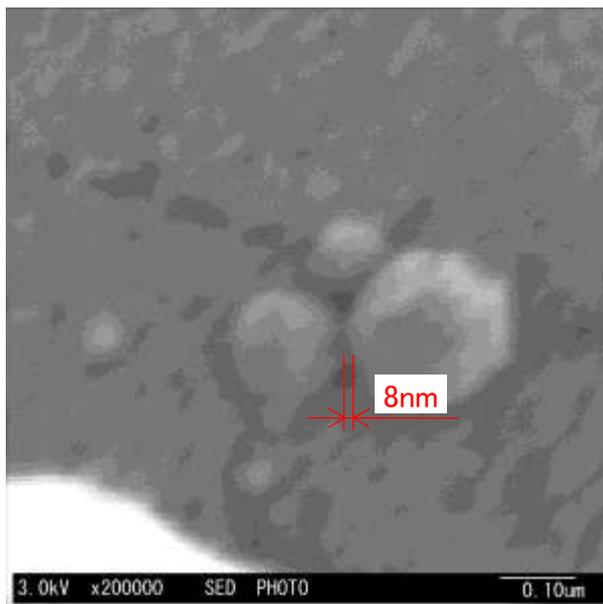


図14 SEM画像

機械的ノイズと電氣的ノイズと磁気ノイズの抑制を個別に実施し、最終的な総合結果として8nmの分解能を得ることができた。

#### (4) 化合物半導体の画像評価

これまでの試料観察は一般的な導体によるものであったが、川下産業には化合物半導体の観察をメインとする分野もある。そのため、化合物半導体用のベース基板となる山口光半導体社のPSS (Patterned Sapphire Substrate : パターン加工されたサファイア基板) を観察した。画像を図15に示す。

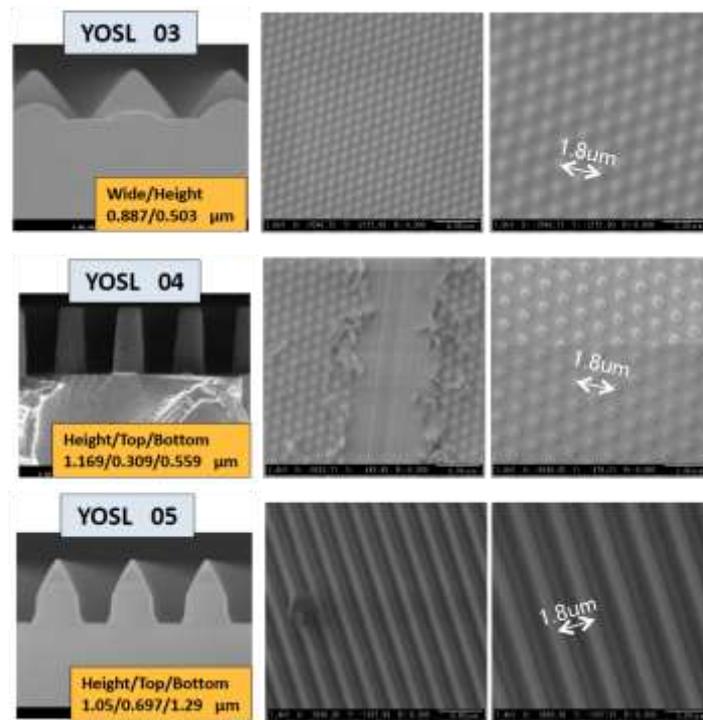


図15 山口光半導体社のPSS

一般的には、絶縁物であるサファイアを導体コート無しで観察するには低加速で観察するしかないが、それさえも汎用SEMでは難しい。更にこのサンプルの観察を難しくしているのは、その表面に1μm近傍の高さで加工された突起が配置されており、それをサブμm精度で観察、計測しなければならない事である。つまり、低加速かつ高分解能のSEMでなければ当該サンプルの正確な観察、計測は難しい。しかし、今回の観察では導電コート無しで非常にクリアな画像を取得することができた。

#### (5) 結論

目標に掲げた高分解能化の分解能においては川下産業のミニマルファブの要求値である10nmは満足できたが、高度化目標に掲げた2nmは未達であった。今後は分解能の向上に重点をおいた補完研究により、目標達成のため継続的に実施する。

一方で、もう一つの目標である長寿命化は目標の2年を達成できた。これは超高真空を維持したことに繋がり、電子線を安定的に放出する上で非常に重要な性能である。

本項で開発した電子光学系の外観図を図16に示す。また、ユーザが直接操作するためのインターフェース画面を図17に示す。そして、これまでの評価で本電子光学系は汎用SEMと比較すると以下の点が優れた特徴と考えられる。

- ・装置外形が297×450×1440mmで容積比1/75と非常に小さい。
- ・自動搬送系や測長機能や精密ステージが搭載されていないが、本装置は標準装備である。

- ・ 導体コートを施さずとも、低加速でチャージアップせずに観察することができる。



図16 装置外観



図17 操作メイン画面

### 2-1-3 今後の課題

ミニマルファブシステムなどの一部市場での装置スペックは満足できたが、さらに幅広い川下産業をターゲットにした場合では、分解能2nmが要求される。そのため市場へ製品投入をしつつ、あわせて補完研究による高度化も継続的に実施する。

## 2-2 異形小型化高真空ポンプの開発

株式会社TCK

取締役社長	小坂 光二
開発課 課長	大江 隆
開発課 主任	国松 浩司
開発課 主任	徳田 基
開発課 一般	江崎 学

## 2-2 異形小型化高真空ポンプの開発

### 2-2-1 開発目的と目標

ミニマルファブの筐体規格に準拠したCD-SEMを開発するにあたり、超小型電子光学系基本体と同様に装置を構成している各主要ユニットの性能維持を前提とした小型化が必須となる。異形小型高真空ポンプも同方針である。そのため、収納空間が制約されたなかでも、性能維持が可能な真空ポンプを開発する。そこで、サブテーマ[2] 異形小型化高真空ポンプの開発においては、①CD-SEM用異形小型高真空ポンプ・制御電源の設計、②CD-SEM用異形小型高真空ポンプ・制御電源の製作及び調整、③CD-SEM用異形小型高真空ポンプ・制御電源の評価に取り組む。

表3 開発目標

項目	目標
ポンプ構成	SIP機能とゲッタ材の複合ポンプ
寸法	100×120×120 mm 以内
到達真空度	$1 \times 10^{-6}$ Pa

### 2-2-2 研究成果

#### 2-2-2-1 CD-SEM用異形小型化高真空ポンプ・制御電源の設計

##### (1) 目的

CD-SEMは電子線応用機器であり、筐体内部に高真空対応排気ユニットを内蔵することは不可欠である。そして、ミニマルファブの筐体規格では汎用の小型真空排気系ユニットを内部に配置する事は極めて難しい。そこで、サブテーマ[2] 異形小型化高真空ポンプの開発においては、①CD-SEM用異形小型高真空ポンプ・制御電源の設計、②CD-SEM用異形小型高真空ポンプ・制御電源の製作及び調整、③CD-SEM用異形小型高真空ポンプ・制御電源の評価を実施した。

図18左に、一般的な汎用品で構成したミニマルファブ筐体規格における小型真空排気系の配置図を示す。現時点で入手可能な最も小型のSIPポンプを配置しても、ミニマルファブ筐体より100mm以上のはみ出しがあり、設計工夫だけでは到底収まらない。そこで図18右に示すように、装置の中核となる電子光学系基本体をユニット内部に配置した際の余剰空間を利用し、その狭小空間に装着することが可能な高真空対応で排気速度が大きな異形小型化高真空ポンプを独自に開発する事を研究目的とした。

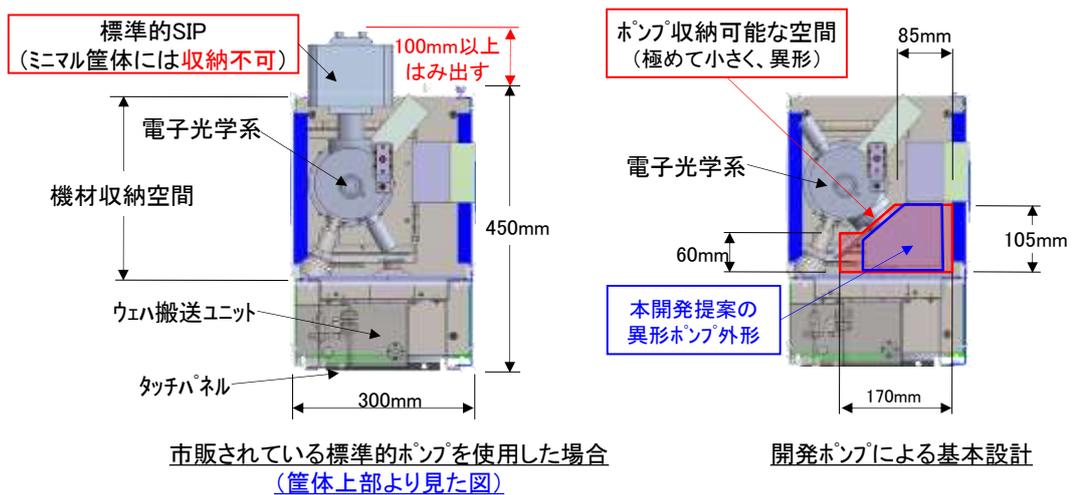


図18 ポンプ配置空間

以下に中心となる開発主要項目を列挙する。

- ① 本開発装置においては、その電子線源にサーマルフィールドエミッション方式を採用しており、安定で良質な超高真空環境が必要となる。超高真空用真空ポンプ群は大がかりなユニットであるが、また一方で、装置規格をミニマルファブ筐体規格としているので、真空ポンプ含めてユニット全体を小型化する必要がある。  
ただし、真空ポンプの基本原理では、排気ユニット自体を小型化すると排気速度も低下するのが一般的だが、本開発においては、二律背反するこの問題を解決する新しいタイプの真空ポンプを開発する。
- ② 真空ポンプだけでなく、その真空ポンプの制御電源も筐体内に配置するので、それに関しても一般的に市販されている19インチJISラック搭載タイプのものでは装置内への設置が困難となる。そこで、新たに小型化（外形寸法：250×200×300mm以下）した電源を再設計する。その際、使用しない機能が組み込まれていてオーバースペックになっている従来の電源を徹底的に見直し、本ポンプ専用の特化した機能だけを収納した小型専用電源とする。
- ③ 本真空ポンプは電子光学系基本体へ取り付けるので、電子線への影響を最小限とするために、磁場漏洩の低減対策としてシールド機構の内部構造化も実施する。

本開発で目標とする新型真空ポンプの基本構成はチタンバルクの表面活性を応用した非蒸着型ゲッタポンプと小型SIP(Sputter Ion Pump)の異なる二つの排気機構を複合したものである。基本性能としては活性および不活性気体のいずれもが排気可能であり、装置筐体内の余剰空間に配置可能な外形寸法（100×120×120mm（各辺±25mm以内））とした上で、同等外形のSIPでは難しい高い排気性能の実現を目指した。

## (2) レイアウト設計

CD-SEM用異形小型高真空ポンプ・制御電源の設計には真空ポンプ構造および動作原理に関する技術や筐体内レイアウト設計が重要となる。また、真空ポンプを動作させるための電源および制御回路やコントロール方法に関するノウハウも必要となる。そこで、これまでに培ってきた真空応用技術を活用し、本研究テーマの設計を実施した。

真空ポンプと制御電源の設計に際し、以下の点に留意した。

- ① ポンプ内部の基本構成をチタンバルク材の表面活性を応用した非蒸着型ゲッタ (NEG) ポンプと小型SIPの組み合わせた複合型での設計
- ② 装置筐体内への配置や取り付け可能となる形状と寸法での設計
  - ・ ポンプ外形寸法 : 100×120×120mm (各辺±25mm以内)
  - ・ ポンプ電源外形寸法 : 250×200×300mm以下
- ③ SIPに不可欠なマグネットからの漏洩磁場が電子線に与える影響を極力低減化したシールドの実施

図19にポンプ配置および形状検討内容を示す。高真空ポンプと同制御電源を筐体内に格納することを目的に、開発検討を行った。その結果、筐体内には効率的配置ができたが、角形NEGポンプと丸型SIPによる結合では、サポート部材の複雑化によるポンプ空間の圧迫が発生、複雑機構による2倍以上の加工コスト増大など、実際の製作観点における問題点が発生し、再検討が必要となった。そのため、製造工程およびコスト面を考慮して形状を円筒形状ベースとし角形部を排除して加工しやすいものとした。さらに、高さ方向に延長した形状変更によって排気性能の向上と容積率の向上が見込めることも判明した。

また、CD-SEM用異形小型高真空ポンプとしては到達真空および排気速度の目標を大きく上回る高性能なポンプとなり、それに最適な制御電源とするため、以下の指針に基づいて設計を実施した。

- ④ 制御電源の微少電流の検出対応
  - ・ 高真空から超高真空領域までを安定的計測できる制御電源を開発する。
  - ・ 微少電流のnAオーダーまで計測可能とする。
  - ・ 真空ポンプには5kVの高圧電源供給が必要なため、ポンプに隣接した取り付けとし、120×180×150mm以下の寸法に抑える。
  - ・ スパッタリングイオンポンプの電源突入時は数百uA程度の電流が必要で最大必要出力電流は1mAであること。

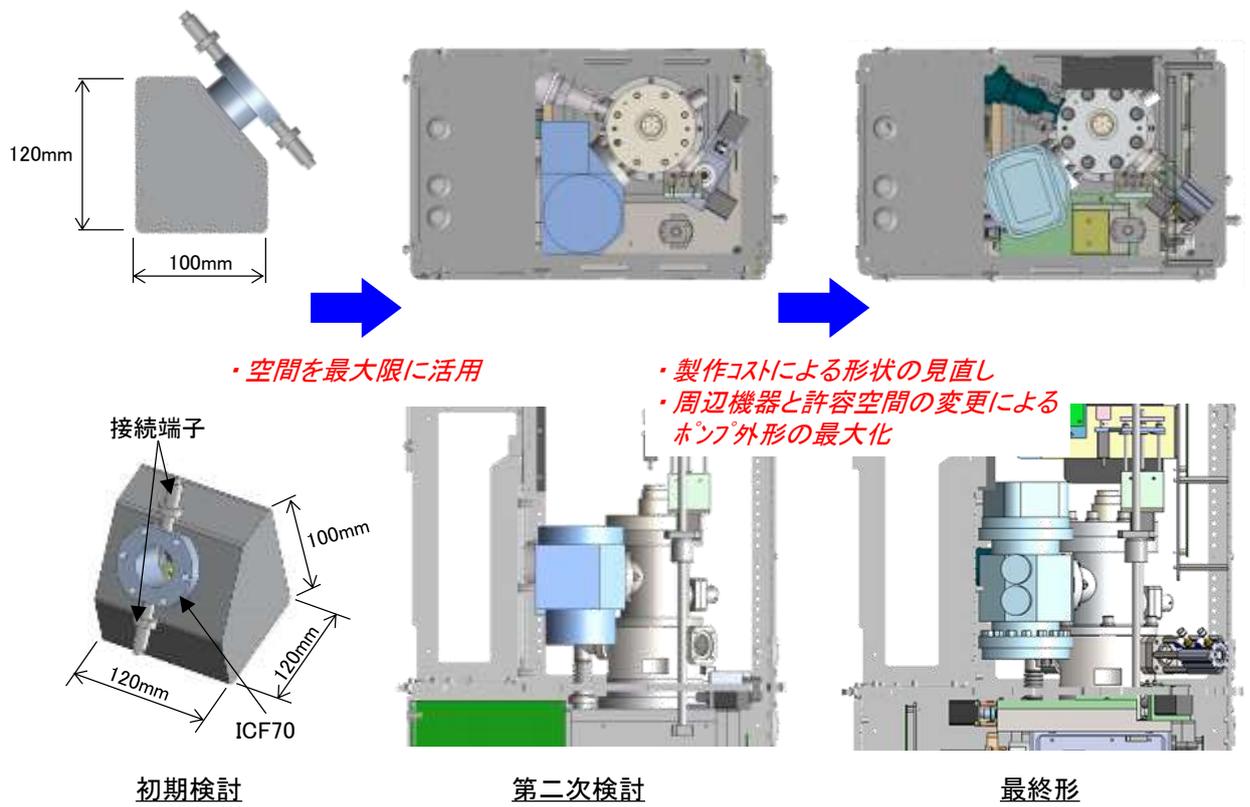


図19 ポンプ配置および形状検討

以下の図20に制御電源の格納空間を図21に電源基板の設計寸法図を示す。

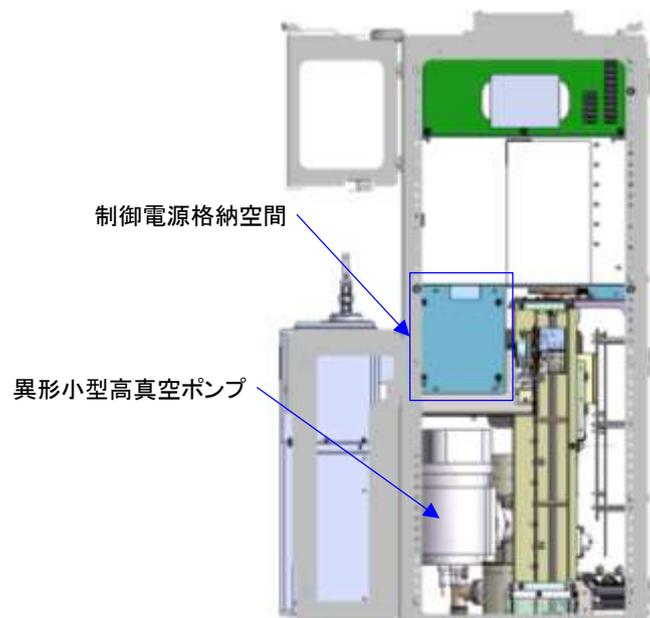


図20 筐体内の制御電源格納空間

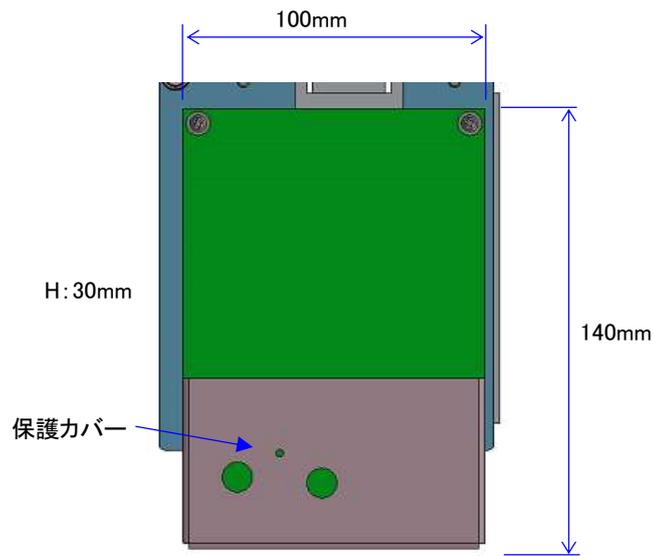


図21 制御電源基板の設計寸法図

制御電源の格納場所は異形小型高真空ポンプの直上に配置した。高圧電源ケーブルの引き回しを短くしたことで性能の保守となり、さらには安全面の確保を考慮した配置とした。また、制御電源基板は、高圧電源が搭載された回路で構成されるため感電の危険性が有り非常に危険である。そのため、メンテナンス等で周辺にアクセスした際でも手などが触れないように基板に保護カバーを追加した。

改良型制御電源のプロトタイプ機では、超高真空状態の計測機能の基本性能が確認できた。基本回路としてはその結果を踏襲しつつ、さらに高性能を目指し、微小電流を安定的に計測できる回路の開発に取り組んだ。内容としては、微小電流を正確に計測するために入出回路をアイソレーションしてバックグラウンドのノイズをキャンセルする。その結果、ノイズ耐性を高めることで微小電流を正確に計測できる設計とした（図22）。

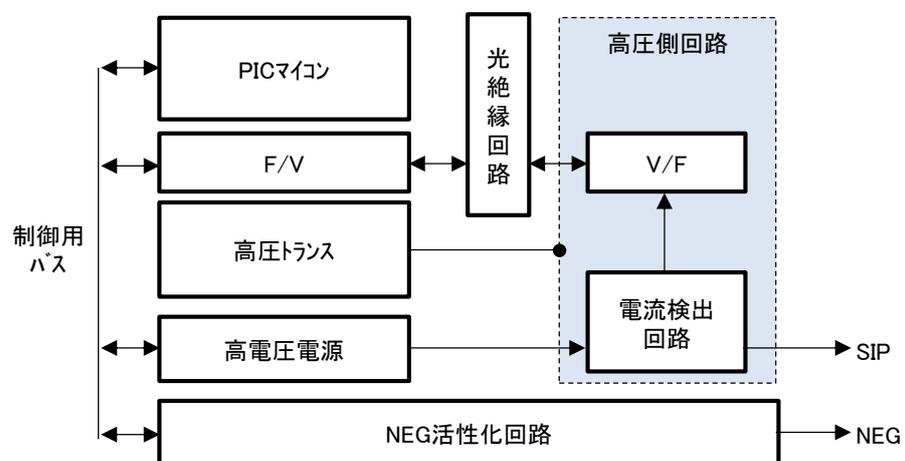


図22 制御電源基板のブロックダイアグラム

## 2-2-2-2 CD-SEM用異形小型化高真空ポンプ・制御電源の製作及び調整

本サブテーマで高真空ポンプを製作するには、ポンプ自体が非常にクリーンであり、真空状態に悪影響を及ぼす要因を全て排除することが重要である。そのため、全ての構成部品をクリーンな状態とし、なおかつ高真空領域に曝される部品はその表面に分子吸着作用が働きにくくなる処置が必要となる。そのため、全ての部品に以下の処理を施した。

### (1) クリーン作業

- ①バラシ作業 : 完成形の状態から部品1点1点の状態に戻す。
- ②洗浄(一槽目) : 超音波洗浄器と超純水を用いて部品表面に付着している僅かな油や細かなパーティクルを除去。
- ③洗浄(二槽目) : 超音波洗浄器とアルコールを使用して一槽目で除外しきれなかった油やパーティクルを除去。
- ④拭き取り作業 : アルコールとワイパーにて拭き取り仕上げ。

さらに高真空領域内に曝される部品については、上記工程の処理後以下の作業を実施した。

### (2) 脱ガス処理

- ①焼だし作業 : 真空状態にした容器内で高温に保ち数時間ほどベーキング。

異形小型高真空ポンプの全部品で上記2つの工程に分けて作業を実施した。

次に、部品のクリーン洗浄実施後、ポンプ機能毎にモジュール化したユニットをそれぞれ組み上げた。さらにそれらのユニットを一体化して最終形状となる異形小型高真空ポンプに組み上げた。

組立工程を経て実体化したポンプは、機能をアクティブにするために以下の順序での作業を行った。

### (3) ベーキング作業

ポンプ自体の内面に付着した分子を除去した。

### (4) NEGポンプの活性化

NEG機能部をアクティブ化するため、ポンプ本体を高温で暖めた。

### (5) SIP電源供給

NEGポンプを活性化した後に電源を投入した。

### 2-2-2-3 CD-SEM用異形小型高真空ポンプ・制御電源の評価

前項までで製作した異形小型高真空ポンプ、制御電源について性能評価を行った。

#### (1) 漏洩磁場の計測

SIPから発生する漏洩磁場の計測を取付フランジ面基準で座標系および距離を変動させて測定を行った。目標は、漏洩磁場が100mmの位置で250uT以下で測定ポイントおよび結果を以下の図23に示す。

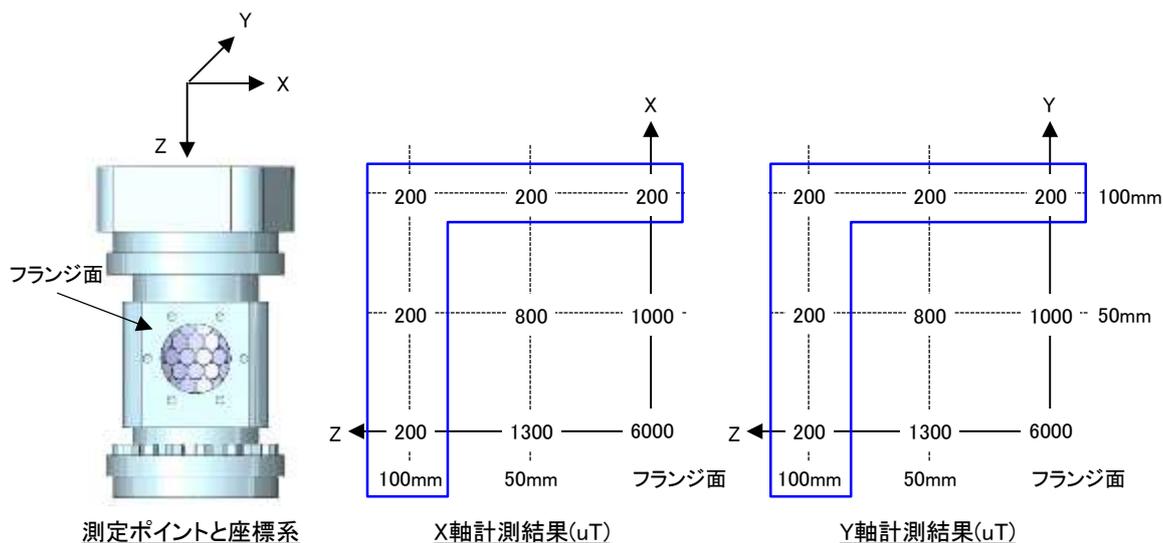


図 23 漏洩磁場計測結果

計測結果から座標系X, Y, Zのいずれの方向に対しても目標を達成できた。

#### (2) 異形小型高真空ポンプの評価

異形小型高真空ポンプのポンプ本体部の開発は平成25年度および平成26年度で目標性能を達成した。評価項目と性能を以下に示す。

- ①外形寸法 : 100×100×160mm
- ②重量 : 5kg
- ③到達真空度 :  $3.0 \times 10^{-9}$ Pa
- ④排気速度 : 201 L/s@H2 (図24)

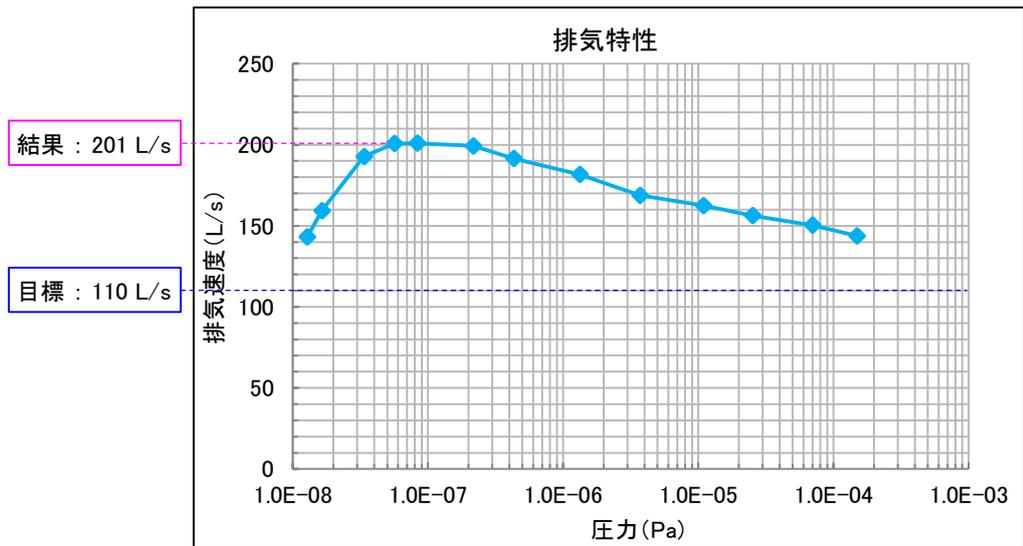


図 24 排気速度

(3) 異形小型高真空ポンプ用制御電源の評価

異形小型高真空ポンプに特化した制御電源の開発に取り組んだ。ポンプ本体性能が目標以上に進んだことで、制御電源も当初の目標よりも高性能化に取り組んだ。それらの性能評価項目を以下に示す。

- ①外形寸法 : 100×140×28mm (図25)
- ②重量 : 0.9kg
- ③最大出力電圧 : 5kV / 2mA
- ④最小読み取りレンジ :  $3 \times 10^{-9}$ Pa

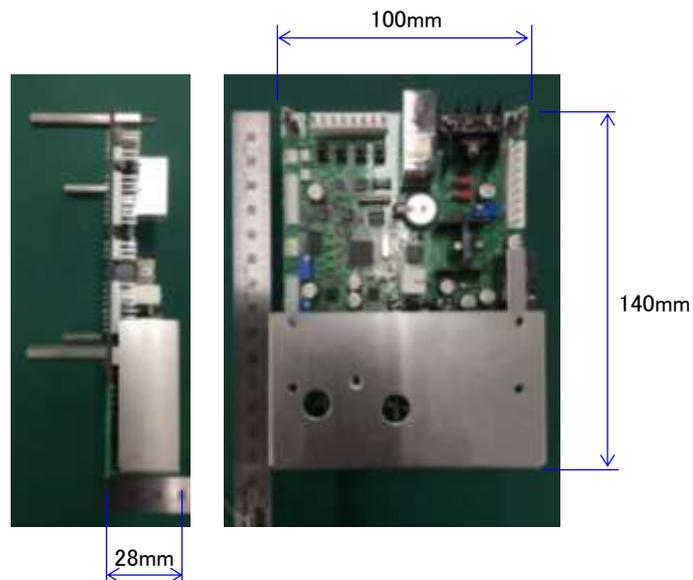


図25 制御電源の外観

#### (4) 結論

到達真空度の当初の目標は $1.3 \times 10^{-8}$ Paとしていたが、NEG機能部を十分に高効率化できたことによって $3.0 \times 10^{-9}$ Paまでの真空を達成した。また、排気速度も当初目標としていた110 L/s以上に対して2倍弱の201 L/sを実現した。

開発当初は運用時の真空度状態が $10^{-7}$ Pa台～ $10^{-8}$ Pa台を想定していたため電源容量の大きいものを開発し組み込んでいた。しかし、本開発の成果として真空ポンプと超小型電子光学系基本体の真空状態が良好なため、想定していたよりも真空度の低い $10^{-9}$ Pa台での運用ができています。その結果から真空ポンプの特性に合わせて制御回路の最適化ができたことで小型化に成功した。また重量も小型化とともに軽量化が進み0.9kgとなり、こちらも目標を達成できた。

次に異形小型高真空ポンプと開発した制御電源を用いてポンプ立ち上げ性能を評価した。超小型電子光学系基本体に取り付けた状態で、基本体の真空度を $10^{-5}$ Pa台まで下げた。その状態をスタートとして評価を開始した。その測定結果を図26に示す。一般的なフィールドエミッション型電子顕微鏡では電子光学系とポンプを超高真空にするには3日間程度要するが、本ポンプでは2日間で十分である。さらにポンプ単体での立ち上げについても2時間強もあれば $10^{-9}$ Pa台の超高真空状態を作ることができる。これは、ポンプの排気速度が十分な性能を有しているためと考えられる。

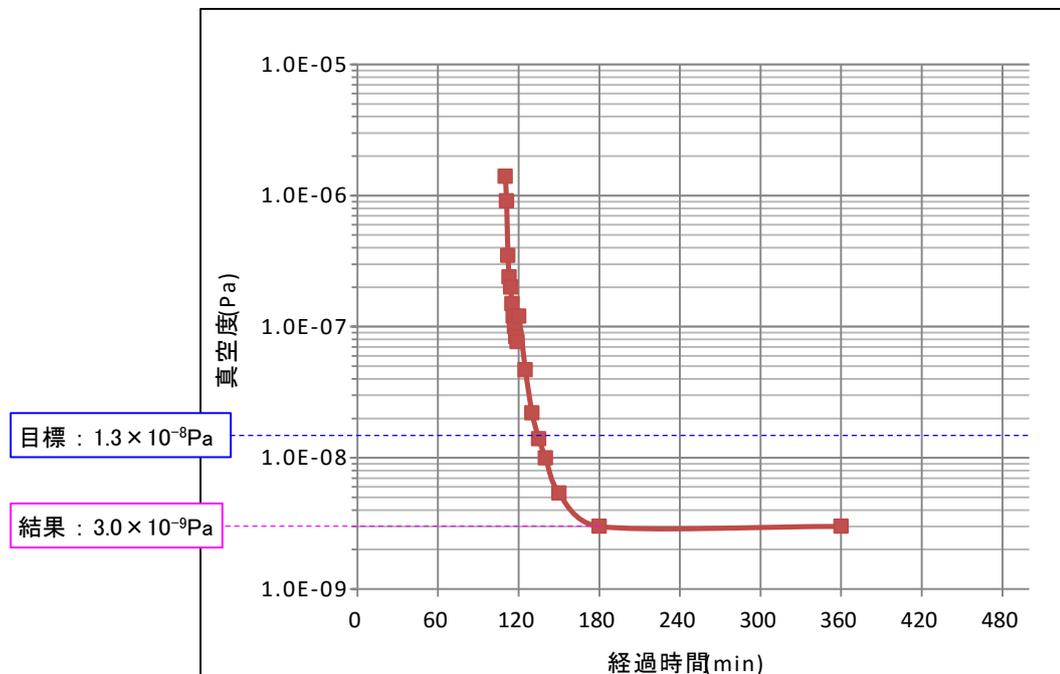


図26 到達真空度

制御電源を超小型電子光学系基本体に取り付けた状態を図27に示す。また、現在の運用状況を図28に示す。運用開始から4ヶ月を過ぎたが真空状態は $3.0 \times 10^{-9}$ Pa

で非常に良好な状態を保っていた。本項目にて開発した異形小型高真空ポンプは、ポンプ単体の性能も小型ながら非常に高いため、数社から引き合いを受けており、早急に製品化を目指す必要がある。



図27 制御電源取付



図28 運用状況

### 2-2-3 今後の課題

SEM用の真空ポンプとしての性能は十分に得ることができているが、製品寿命などの評価が残るため、今後の評価が必要となる。また、拡販に向けてSEM以外の超高真空装置用ポンプとしての応用方法などの探索を実施する。

## 2-3 線幅判定アルゴリズムの開発

株式会社TCK

取締役社長	小坂 光二
開発課 課長	大江 隆
開発課 主任	国松 浩司
開発課 主任	徳田 基
開発課 一般	江崎 学

国立研究開発法人産業技術総合研究所

ナノエレクトロニクス研究部門

3D集積システムグループ付

つくばイノベーションアリーナ推進センター

連携推進ユニット長 兼務 青柳 昌宏

主任研究員 渡辺 直也

研究員 フェン・ウェイ

株式会社山口光半導体研究所

## 2-3 線幅判定アルゴリズムの開発

### 2-3-1 開発目的と目標

多品種少量製造ラインでは、要求される測定精度を満たすことと同時に、高速処理を実現することが求められている。現時点においては、当該要求を満たすようなソフトウェアはないため、目的に合致した最適ソフトウェアを最新アルゴリズムで開発する必要がある。そのため、高速処理アルゴリズムによる線幅計測技術の開発を行い超小型電子光学系に融合する。

そこで、サブテーマ[1]超小型電子光学系の開発においては、①線幅判定アルゴリズムの開発、②線幅判定アルゴリズムの評価に取り組む。

表4 開発目標

項目	目標
計測時間(1ヶ所)	0.1秒
高精度化	1nm以下

### 2-3-2 研究成果

#### 2-3-2-1 線幅判定アルゴリズムの開発

CD-SEMは電子顕微鏡の観察性能と画像処理技術を融合させ、半導体製造における各工程での加工線幅を計測する装置である。また、計測に先立ち、その設計データや基板上での位置情報を事前に読み込み、先の計測データとの比較を行った上で、その計測情報を基に製造ラインの状態をホストに知らせる重要なシステムでもある。

現在、CD-SEMによる半導体パターンの計測においては、微細化したパターンを高精度で計測する余り、高倍率観察モードを使用した画像取得を行う。しかし、分解能は向上するものの、線パターンの長さ方向の揺らぎLER(Line Edge Roughness)や線幅の揺らぎLWR(Line Width Roughness)が顕著となり、フィルタ等による処理の冗長化が問題となっている。

そこで「高解像度化→多点サンプリング→フィルタリング」ではなく「低解像度化→畳み込み」で同一の結果を得るアルゴリズムの開発を行い、必要とする最低限度の情報と最短時間で結果を出力するシステムを開発した。

全体的な開発手順を図29に示す。

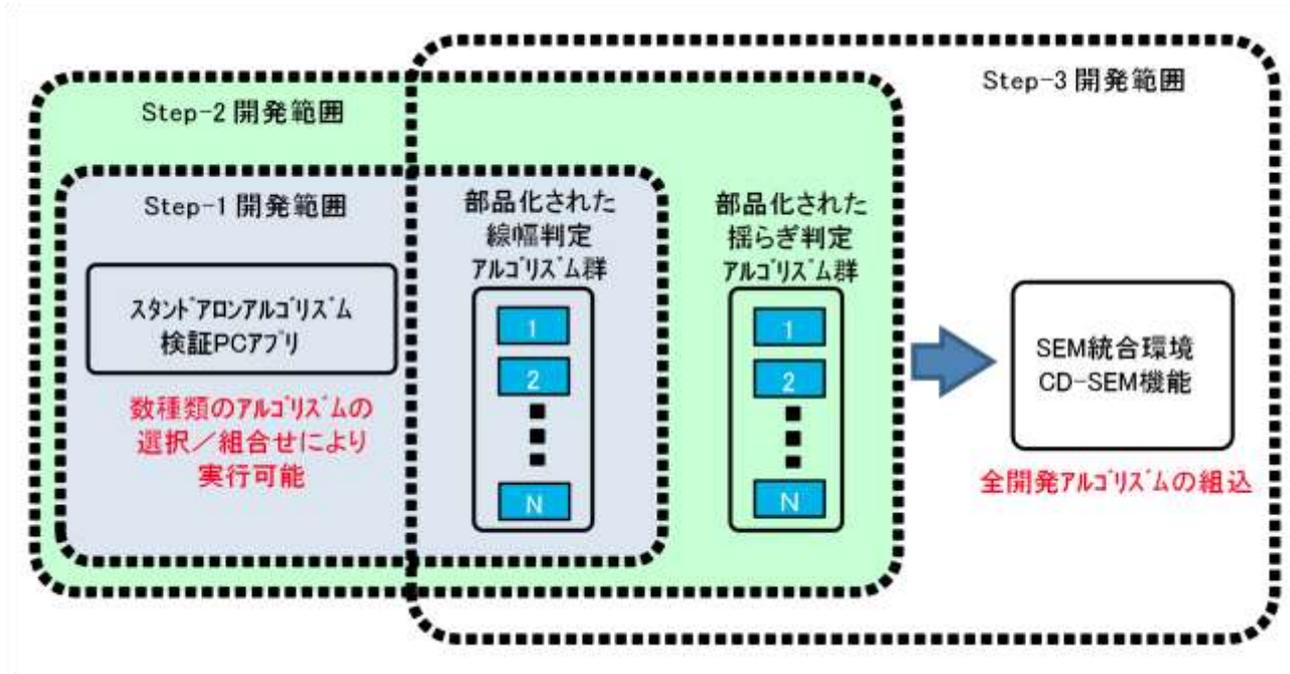


図29 線幅判定アルゴリズム開発ステップ

(1) 開発ステップ

- ・ Step-1 スタンドアロンアプリにより線幅を高速に確定するアルゴリズムの開発
- ・ Step-2 Step-1で開発したアルゴリズムを用いて、得られた結果を連続の線の揺らぎへと分類するスタンドアロンアプリの開発
- ・ Step-3 SEM統合環境への測長機能組込み

(2) 開発方針

- ・ 高速軽量の線幅判定アルゴリズムをベースに、揺らぎ情報を排除した線分線幅を決定する専用アルゴリズムを開発する。
  - － 製造の揺らぎ（ビーム／レジスト）によらず測長が可能な基本アルゴリズムを開発する。
  - － 1ヶ所の線幅計測アルゴリズムを開発し、その近傍領域の複数線幅情報より線幅を確定するアルゴリズムへ拡張する。
- ・ SEMとは独立したスタンドアロンPCアプリを立ち上げ、アルゴリズム検証を行いながらシステムの並行開発を実現する。
  - － TIFFデータを入力として、User I/Fの操作で線幅アルゴリズムを検証できるソフトウェアとする。
  - － 複数の単機能関数を部品化し、必要となる組み合わせを瞬時に実行できる機能を実装する。
- ・ アルゴリズムの部品化により、SEM統合環境への測長機能組込みを簡単化する。

(3) 各研究機関との連携

表5に、山口光半導体研究所、産業技術総合研究所の各研究機関との連携ならびに開発フローを示す。両研究所では、評価用サンプルならびにそれをベースとした評価用画像の作成を進め、それと平行してTCKにて線幅判定アルゴリズム評価のためのアプリを開発した。

表 5 各研究機関の連携スケジュール

	平成25年度	平成26年度		平成27年度	
	下期	上期	下期	上期	下期
TCK	スタンドアロン アプリ作成	線幅判定部 開発	揺らぎ判定部 開発		
山口光半導体研究所	評価用画像 作成	線幅判定部 評価	揺らぎ判定部 評価	最終評価	
産業技術総合研究所	評価用画像 作成				

(4) スタンドアロンアプリ開発

マニュアル計測用アプリでTIFF画像を読み込み、そこから指定した位置のラインプロファイルと指定線幅計測を実行可能であり、これを用いて線幅判定アルゴリズムの検討を行った。

① 評価用サンプルA

図30に山口光半導体研究所社が製作したPSS (Patterned Sapphire Substrate)を示す。

- ・基板サンプル : Sapphire, Silicon
- ・Patternサンプル : PSS, Stripe (図31), Custom (図32)

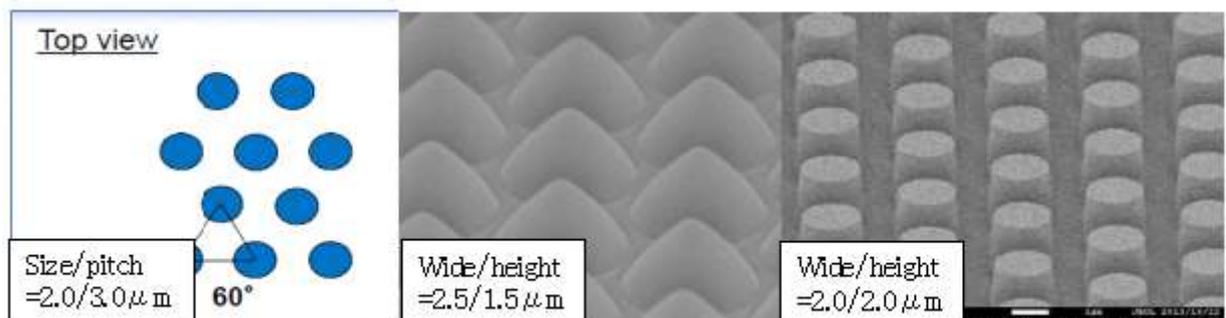


図30 PSS-pattern (参考)

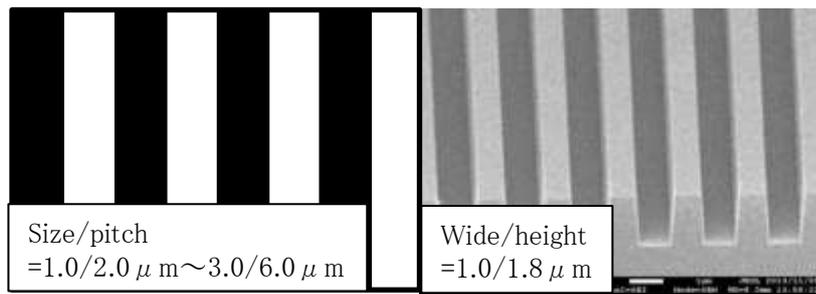


図31 Stripe-pattern (参考)

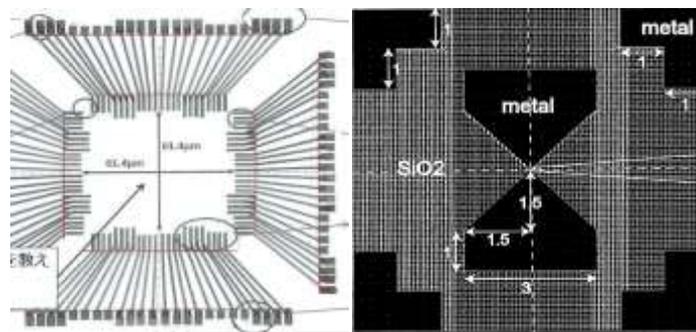


図32 Custom-pattern (参考)

②評価用サンプルB

産業技術総合研究所では、今後のプロジェクトにおける標準サンプルを確立するために、半導体プロセスの主材料であるシリコン基板上に基準パターンを作製した（図33）。完成した評価用パターンの実SEM写真を図34に示す。当該パターンを使用してスタンドアロンアプリの評価を行った。

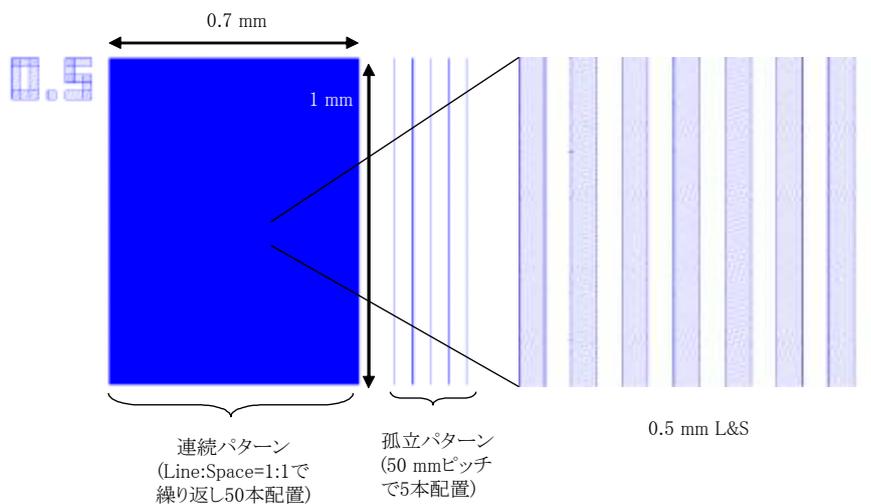


図33 デザインソース例

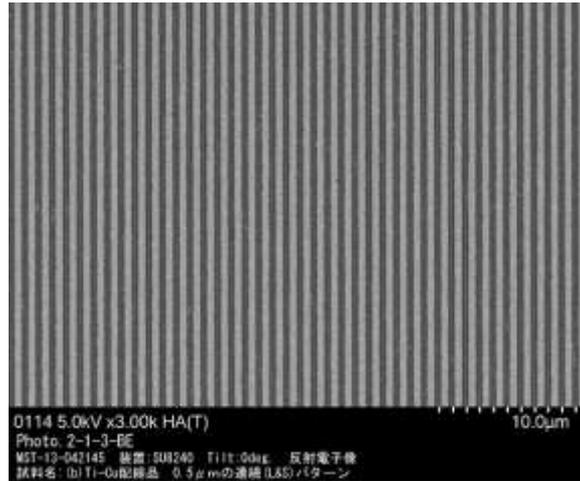


図34 SEM画像

本開発はStep-1からStep-3までの開発フェーズで実施した。まずは、それぞれのフェーズにおける研究内容と開発要素に関して説明する。

### Step-1 線幅判定アルゴリズム

電子顕微鏡においては、電子を照射した試料の表面形状や組成により、SEM画像上での輝度変化が起こる。組成が金属の場合はエッジが強調されたものとなり、表面が非金属（レジスト）の場合は緩やかな変化を示す。また、試料のエッジ部では輝度が上がり、平坦面では下がる。それらを考慮しながら輝度信号のプロファイルを取得し、その幅を同定する。その際の構成要因を図35に示す。

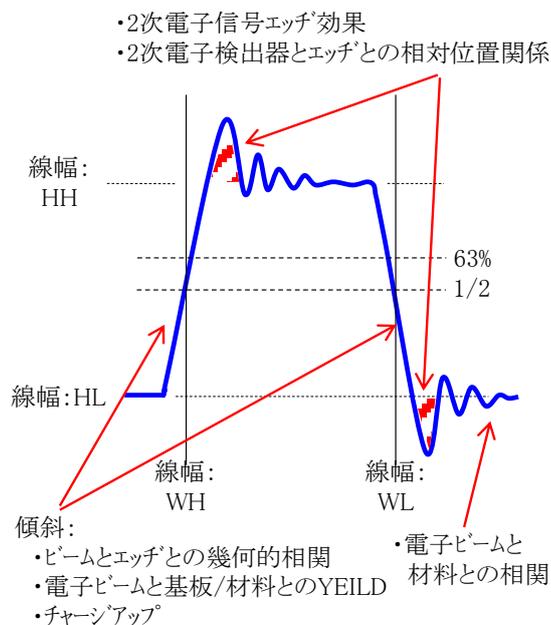


図35 ラインプロファイル形状構成要因

測長対象画像をラインプロファイル化して輝度情報を生成し、パターンクロスセクションとなる台形領域を決定した後、閾値との交点での距離を線幅とする処理が基本となる。アルゴリズム開発に重要となるフローを以下に列挙する。

1) 輝度変化の認識と分類

輝度変化を、エッジ効果や組成変化、そして滑らかな変化などへの分類アルゴリズム。

2) 台形生成

エッジが強調された輝度変化パターンの場合と滑らかな場合とでは、判定基準が異なる。強調時には、エッジ効果によるオーバーシュートを除外した頂点から台形を形成する。また、滑らかな変化パターン時には、立上り／および立下り曲線のある点での接線により台形を形成する。

3) 線幅決定

生成された上記、輝度変化パターンや他の要因から、線幅として最適な台形高さの1/nを導出するためのアルゴリズムを開発する。

線幅判定処理の流れを図36に示す。

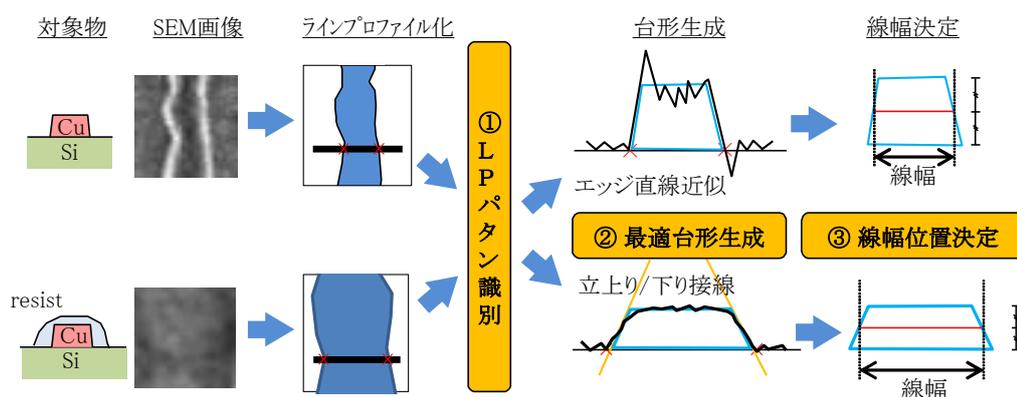


図36 線幅判定アルゴリズム

Step-2 揺らぎ判定アルゴリズム

図37左に示すような整然としたLine & SpaceのCADデータでも、実際に製造されたパターンをnmレベルで観察すると、製造の揺らぎ（ビームかつレジスト）が顕著に現れる（図37右参照）。このエッジ状態では、線幅測長の基本である断面プロファイルを生成した際にはデータ自体が大きく揺らぐ。

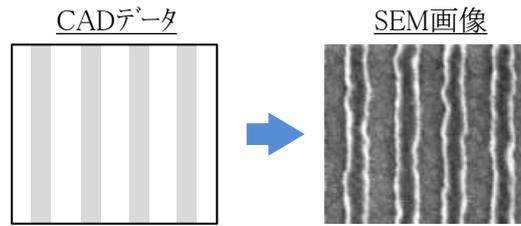


図37 SEM画像の揺らぎ

揺らぎ要因は以下に大別できる。

- A) ビーム (=加工方法) の揺らぎ
- B) レジスト (=高分子) の揺らぎ
- C) 高解像度化による揺らぎの顕著化

これらの揺らぎ画像から断面プロファイルを生成し、正確な測長を行うために、以下のアルゴリズムを開発する。

- 1) 揺らぎ情報の認識
  - 2) 揺らぎ情報の除去を含めた線幅同定
- それらの判定処理フローを図38に示す。

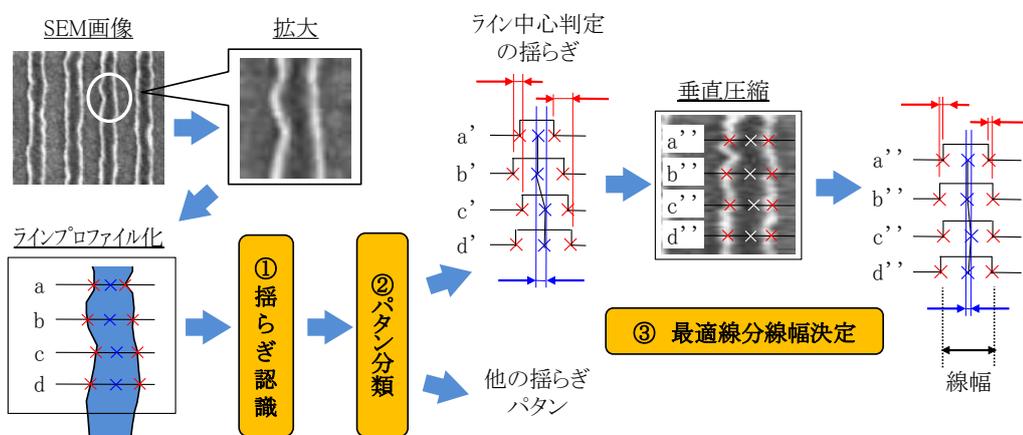


図38 揺らぎ判定アルゴリズム

#### (5) ユーザインターフェースの開発

計測時におけるユーザインターフェースに関して検討した。一般的なCD-SEMの測長機能はパラメータ数が非常に多く、煩雑な設定や操作が要求される。パラメータについては1回の計測につき20点程度の設定を求められるが、ミニマルファブ規格のタッチパネルで同様の操作は生産性が非常に悪くなる。また、入力支援用のソフトウェアを開発しても設定できるが生産性が向上するとは考えにくい。そのため、パラメータ設定箇所を少なくし、なおかつ選定するだけで計測が可能なユーザインターフェースの仕様とした。また、測長におけるキャリブレーション

は一般的なCD-SEMの場合、数百万円もする高価な計測基準器を使用するがミニマルウェハを使用する上では困難である。また、ミニマルウェハ対応の計測基準器を製作したとしてもコストパフォーマンスが非常に悪い。そのため、電子光学系基本体に搭載している精密エンコーダを応用してキャリブレーションが可能なインシステムとする。それにより非常にコストパフォーマンスが高く、使い勝手の良い装置となる。

まず、線幅を検出する際に白黒8bitのSEM画像からユーザ指定されたライン上で特徴点を見つけ、ある2点間の距離を測長データとして算出する。はじめに自動測長アルゴリズムの処理フローについて検討した。処理フローを図39に示す。

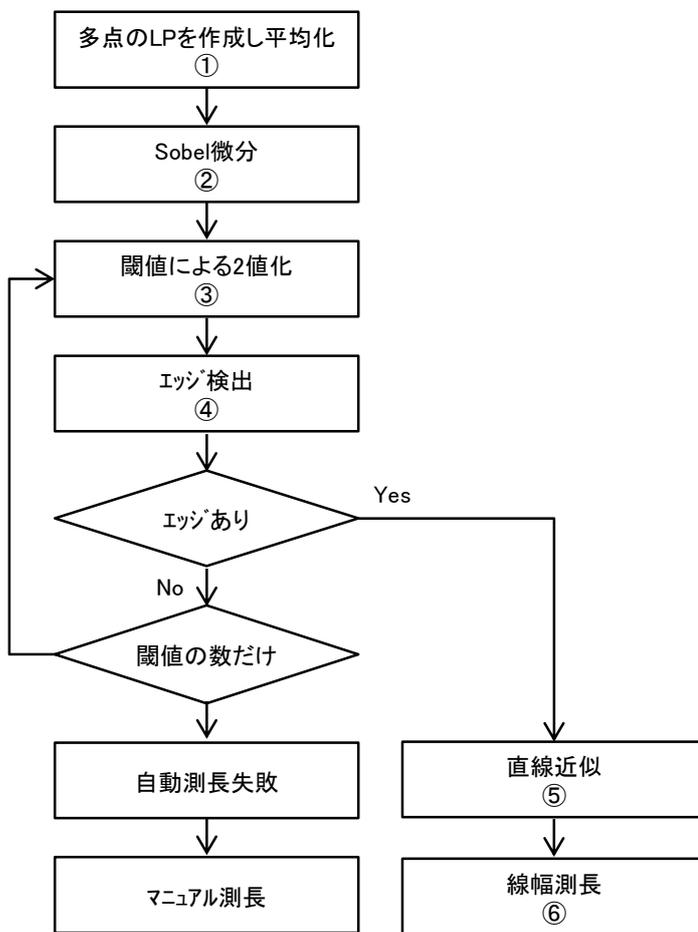


図39 測長アルゴリズムフロー図

フロー中の各ステップでの処理を図40に示す。図40に示す各グラフは横軸を画像の画素位置、縦軸は輝度を示し、各項目の処理内容は以下に記述する。

- ① 画像から得られる輝度情報を元にラインプロファイルを生成する。ただし、ここで得られるラインプロファイルでは1画素のピークを安定的に検出することは難しいため、線幅位置の確定ができない。
- ② 特徴点を示す画像周辺には輝度差の少ないデータが存在するため、その特

微点を検出し易くするためにフィルタ処理を行い、そのポイントを強調する。

- ③ ②項にて強調したポイントを4箇所検出するまで閾値を変化させラインを4本検出する。
- ④ ③項で検出したエッジによりエリアを分割する。
- ⑤ ①項で生成したラインプロファイルから近似直線を生成する。
- ⑥ ④及び⑤項の結果から線幅を確定する。

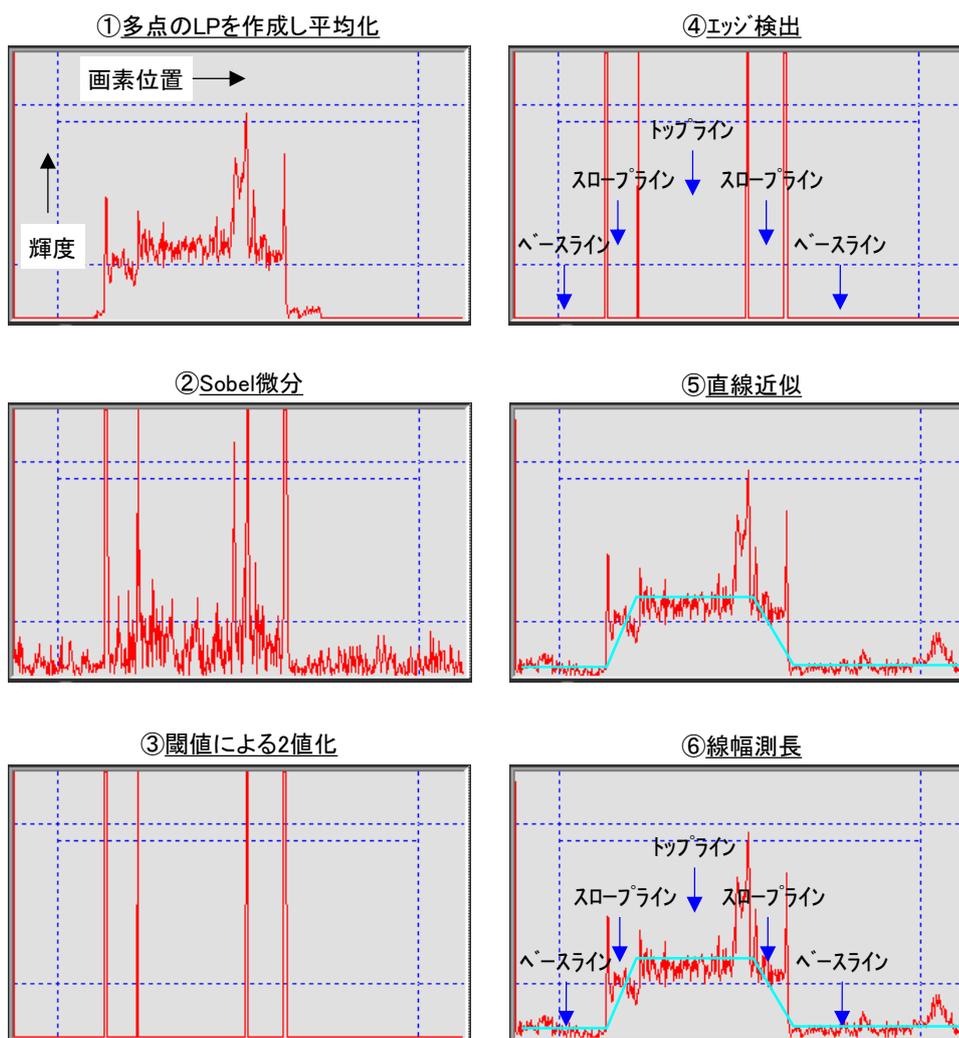


図40 測長アルゴリズムにおける各処理内容

図40の①項でラインプロファイルを生成する際に安定的に生成ができなかったことからラインプロファイル生成時に重畳化処理を追加した。1点生成時と5点重畳生成を比較した。

その結果、重畳化によってラインプロファイル生成の確率は非常に高くなり生成エラーも無くなったが、Sobel微分を行う際に頻度は少ないがエッジ検出処理を失敗することがあった。そこでラインプロファイルを平滑化するためにガウシア

ンフィルタ処理を追加した。

ガウシアンフィルタによる処理を行うことでラインプロファイルに現れていたノイズが抑制できた。これによりエッジのピークポイントを検出する際の誤検出が格段に減少した。これでエッジの有用性は確認できたが、フィルタ自体が最適かどうかの見極めができていない。そこでガウシアンフィルタと比較するためにエッジの平滑化に適用されるフィルタの中で最も効果的とされるバイラテラルフィルタを選定し比較した。

この結果からSEM画像にはガウシアンフィルタの方が有効であることが判明した。したがって、ガウシアンフィルタの処理を組み込んだアルゴリズムの製作を行った。

#### (6) キャリブレーション機能の開発

画面上の長さをインシステムでキャリブレーションするためのアルゴリズムの検討を行った。画面上のキャリブレーションは横軸と縦軸が対象となる。その場合でも、超小型電子光学系基本体にはXY2軸のステージ機能が有り、いずれの軸に対しても対応可能である。そして、計測基準にはステージに内蔵している精密スケールを用い、その精度は長さに対して1/100,000が保証されるため、例えばSEM画像で10 $\mu$ mを計測するとしても0.1nmの精度が確保される。よって、非常に高精度な基準器として応用することができる。図41にキャリブレーション時の画面イメージを示す。また、キャリブレーション時のフローチャートを図42に示す。

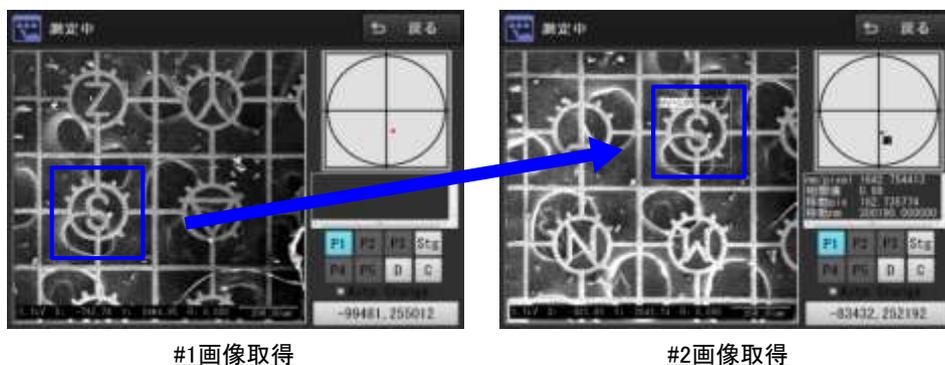


図41 キャリブレーション時の画面イメージ

キャリブレーションの手順は以下のとおり。

- ① 画面上で認識される特徴的な画像をテンプレートとして選ぶ。この時、画質を良好な状態にすると精度が良くなる。
- ② 画面範囲内で極力画面を大きく使ってX軸方向にステージを動かし画像の位置を動かす。
- ③ ②によるステージ座標と画面上のアドレスから画面1pixelあたりの長さを算出する。

- ④ Y軸も同様に②と③と同じ処理を行う。
- ⑤ 画面構成は縦横比が1対1のため、その比率の誤差量が1%以内になるまで②から④の処理を行う。
- ⑥ 上記誤差範囲が1%以内になった時点で完了となる。

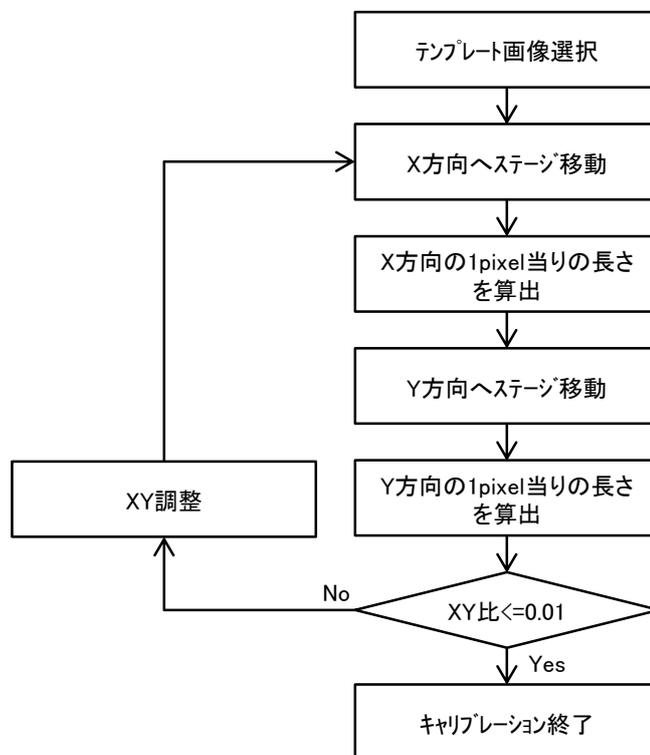
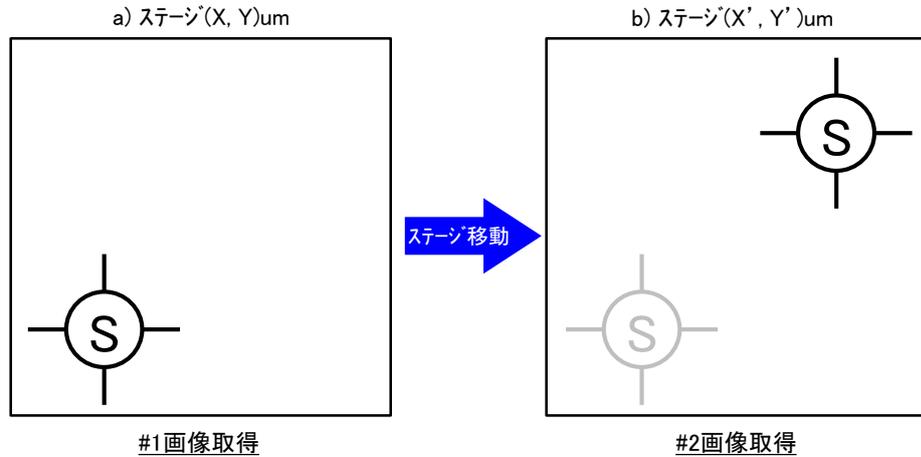


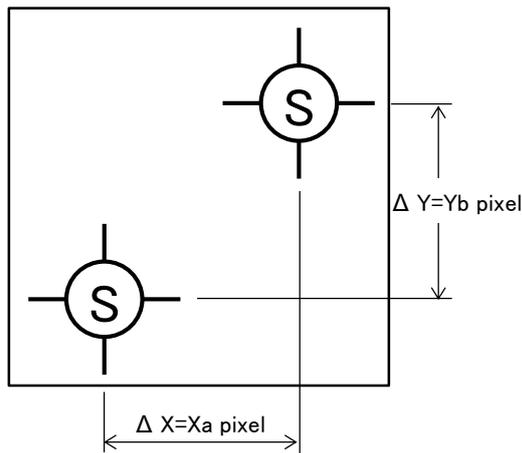
図42 キャリブレーション時のフローチャート

また、ステージ位置座標と画面上のアドレスの定義および算出方法を図43に示す。ステージの位置座標aおよびbの差分と画面上に表示されたテンプレート画像のアドレスの差分を算出し、その比率を求めた。

1. ステージ位置座標および画面上のアドレスを取得



2. 各ステージ位置でのテンプレート画像の画面上アドレスを取得



3. 下記数式により長さを算出

$$\frac{\text{um}}{\text{pixel}} = \frac{\sqrt{((X' - X)^2 + (Y' - Y)^2)}}{\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}}$$

図43 キャリブレーション時のフローチャート

ここまでに開発した線幅検出用ソフトウェアと計測基準のキャリブレーション用ソフトウェアを組み合わせ一つのソフトウェアとし、線幅判定アルゴリズムの評価へ移行した。

2-3-2-2 線幅判定アルゴリズムの評価

当初より開発を進めてきた線幅計測にかかる時間を計測した。計測方法を図44に示す。まず、同様に計測開始時と計測終了時にUSBを介して接続した計測用マイコンボードと通信させ、マイコンボードが通信情報を解析して内部タイマーにより計測時間と計測ステータスを信号出力するようにした。次に、計測ステータスをオシロスコープで計測し、保存されている計測時間が適正であることを確認し

ながら、計測時間の保存に関する判定を行った。

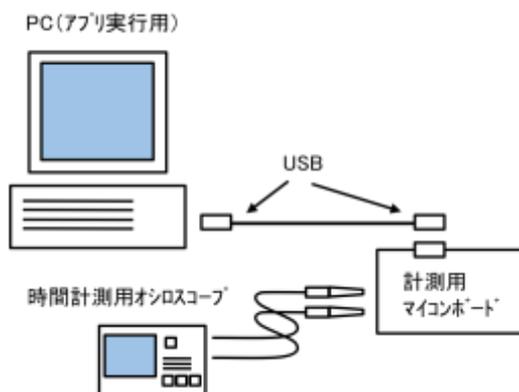


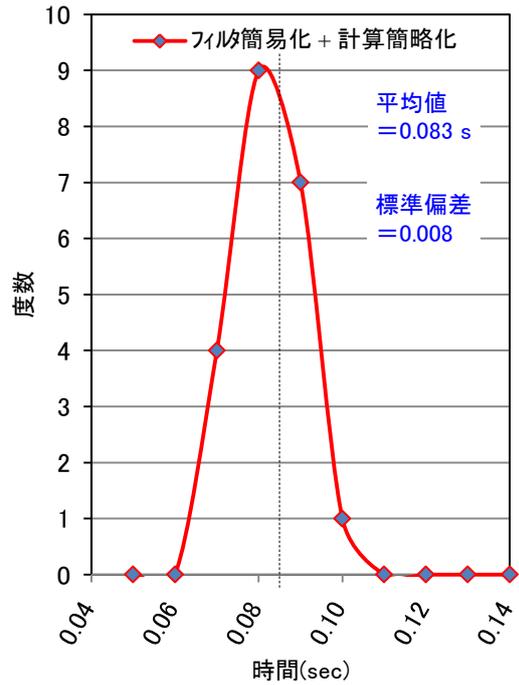
図44 処理時間計測における構成図

本開発の目標は分解能2nm時の処理時間目標は0.1s ( $\sigma$ ) である。また、本評価の計測条件は目標としている2nmに対して2倍精度の1nm分解能で行った。サンプリングには $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ エリアを用い、 $2,000 \times 2,000$ ピクセル構成(1nm分解能)で処理を行った。その処理時間の計測を行い、合計21回のテストを実施した。その計測結果とヒストグラムの区間データを表6に示す。また、グラフ3にはそのヒストグラムを示す。

超小型電子光学系基本体の画質が向上に伴い、計算の基本処理に関する負荷を減少した。まずエッジ検出時にエッジを強調するために複数回フィルタを通していった処理とエッジ強調時のフィルタ適用範囲が狭まったことで処理に関する負荷が減少した。これにより、開発当初から考えていた複雑なデジタルフィルタ処理を簡素化できることが判明した。また、画質改善前はエッジ検出時におけるデータの取りこぼしが多かった。しかし、画質改善によりデータ取得のリトライ処理のループ回数が減少したことやデータ補正に費やしていた計算処理に関する線幅判定関数の実行処理部分も大幅に圧縮できることが判明した。これにより計算の基本処理としての改良を考えた。その結果、これら二つの対策をソフトウェアに反映することで高速化が前進し、実行速度として1箇所あたり0.083sを達成した。今後、さらなる画質改善とともに高速化も進むことが考えられる。

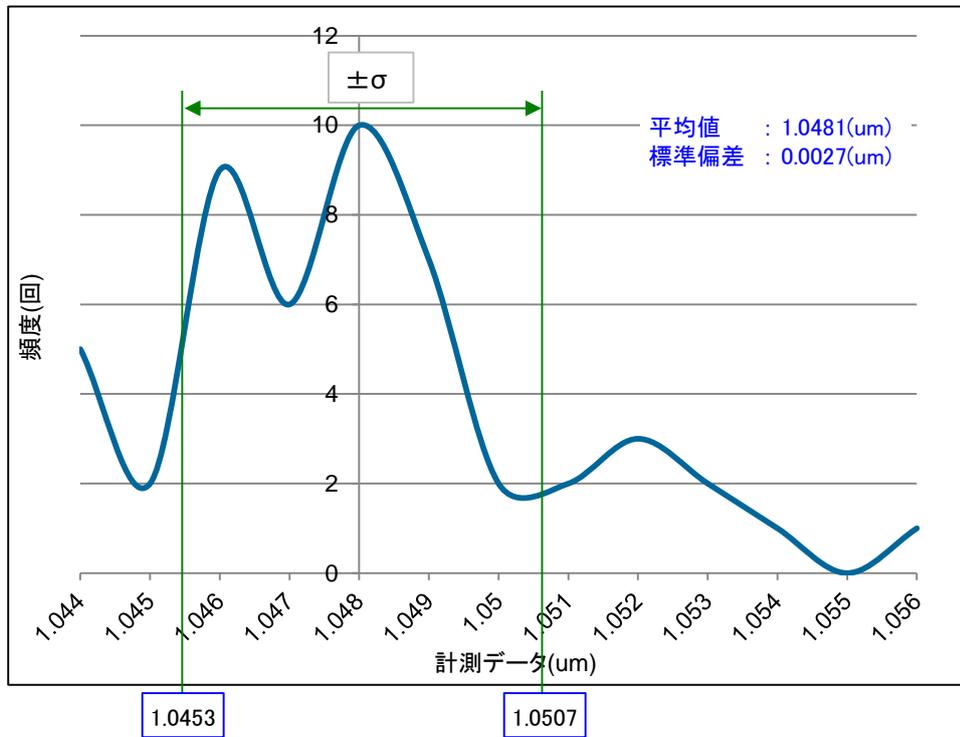
	Time (s)	Value (s)	Freq.
1	0.080	0.05	0
2	0.080	0.06	0
3	0.090	0.07	4
4	0.080	0.08	9
5	0.090	0.09	7
6	0.080	0.10	1
7	0.090	0.11	0
8	0.100	0.12	0
9	0.070	0.13	0
10	0.080	0.14	0
11	0.080	0.15	0
12	0.090	0.16	0
13	0.080	0.17	0
14	0.090	0.18	0
15	0.070	0.19	0
16	0.080	0.20	0
17	0.090	0.21	0
18	0.080	0.22	0
19	0.070	0.23	0
20	0.090	0.24	0
21	0.070	0.25	0

表6 処理時間



グラフ3 高速化ヒストグラム

次に高精度化に関する線幅繰り返し計測の結果を以下のグラフ4に示す。



グラフ4 高精度化計測結果

グラフ4の計測内容は、繰り返し計測として同一のポイントを合計50回計測した。その内容を以下に示す。

- ・計測回数 : 50回
- ・最大値 (um) : 1.056um
- ・最小値 (um) : 1.044
- ・平均値 (um) : 1.0481
- ・標準偏差 (um) : 0.0027

目標の2nmはノイズによる画質低下の影響により達成できなかった。原因としては計測時におけるエッジの揺らぎによるものと考えられる。また、グラフ4が示すようにバラツキが多く、きれいなガウシアン分布にならなかったことから、やはりエッジの揺らぎによる影響であると考えられる。

### 2-3-3 今後の課題

本研究開発期間内において、超小型電子光学系基本体のノイズ対策が完了せず、目標を達成できなかったが、本成果でも仕様要求を満たせる市場へは投入する。今後は補完研究で高度化を推進するとともに得られた成果で市場拡大を目指す。

## 第3章

### 総括

## 第3章 全体総括

### 3-1 まとめ

「超小型電子光学系と異形小型高真空ポンプを内蔵した小型・低価格な測長用電子顕微鏡(CD-SEM)の開発」における三年間の研究成果としては、概ね目標を達成できたが、三つのサブテーマからなる超小型電子光学系の分解能と線幅判定アルゴリズムの高精度化の点のみが目標未達であった。ただし、未達の点についても僅かな目標未達であり、要因としては電子光学系の分解能によるものである。そのため、その点に注力した補完研究に取り組む予定である。その中でも、真空技術を応用した電子顕微鏡や真空ポンプ、精密位置決め技術を応用した真空精密ステージや試料搬送系、画像処理技術を応用した線幅計測など幅広い技術分野での成果を得ることにつながった。

研究期間中においては、ワーキンググループ会議は3ヶ月に1回のペースで開催し、各参加機関の研究内容に関して十分な協議ができた。また、推進会議においては、事業管理機関のもと研究組織外のアドバイザーよりの確かなアドバイスと指摘を受けることで方向性を修正することができ、順調に開発を遂行することができた。さらに研究メンバーならびにアドバイザー等の支援により、技術の応用展開の可能性を探索できた。そして、これらの技術を応用することでCD-SEMのみならず他製品への展開により多岐に渡って川下段業へ貢献することができる。

本開発装置においては、現時点での仕様でも十分に満足するユーザは多く存在し、その代表としては川下産業のミニマルファブである。また、化合物半導体やMEMSなどの産業分野においても十分適応可能なため、製品化および販路構築を急ぐ。

### 3-2 事業化に向けて

本CD-SEMは他の市場流通品と比較すると低価格であるが、価格帯としては決して安価ではない。そのため、販売時には必ずデモンストレーションが必須となる。その中で様々なユーザの声に耳を傾け、機能の充実化などのさらなる高度化を図る。また、真空ポンプはすでに引き合いがある状況なため製品化に向けた取り組みを早急に実施する。そして、これまでと同様に展示会や学会への出展を積極的に行い、市場でのメーカー認知度を高めて販路拡大を目指す。

平成27年度 戦略的基盤技術高度化支援事業  
超小型電子光学系と異形小型高真空ポンプを内蔵した  
小型・低価格な測長用電子顕微鏡(CD-SEM)の開発  
研究開発成果等報告書

平成28年3月

委託者 九州経済産業局  
〒812-8546 福岡市博多区博多駅東2-11-1

委託先 公益財団法人 福岡県産業・科学技術振興財団  
〒814-0001 福岡市早良区百道浜3丁目8番33号  
TEL 092-832-1301 FAX 092-832-1309